

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA
U OSIJEKU
GRAĐEVINSKI FAKULTET OSIJEK

DIPLOMSKI RAD

Osijek, veljača 2017.

Srđan Maričević

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA
U OSIJEKU
GRAĐEVINSKI FAKULTET OSIJEK

DIPLOMSKI RAD

**TEMA: ODREĐIVANJE OSNOVNIH KOMPONENTI ZA IZGRADNJU MALE
HIDROELEKTRANE**

**THEME: DETERMINATION OF BASIC COMPONENTS FOR THE CONSTRUCTION OF
SMALL HYDROPOWER PLANT**

Osijek, 2. veljače 2017.

Srđan Maričević

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAJERA
U OSIJEKU
GRAĐEVINSKI FAKULTET OSIJEK

ZNANSTVENO PODRUČJE:	Tehničke znanosti
ZNANSTVENO POLJE:	Građevinarstvo
ZNANSTVENA GRANA:	Hidrotehnika
TEMA:	ODREĐIVANJE OSNOVNIH KOMPONENTI ZA IZGRADNJU MALE HIDROELEKTRANE
PRISTUPNIK:	SRĐAN MARIČEVIĆ
NAZIV STUDIJA:	Sveučilišni diplomski studij

TEKST ZADATKA:

Za odabrani vodotok izraditi krivulju trajanja protoka. Dati opis mogućih shema malih HE. Odrediti veličinu izgradnje MHE i odabrati vrstu i potrebnu snagu turbina.

Rad treba sadržavati SAŽETAK na izvornom jeziku.

Rad treba izraditi u 3 primjerka (original + 2 kopije), tvrdo ukoričena u A4 formatu i cjelovitu elektroničku datoteku na CD-u.

Osijek, 24. studeni 2016.

Mentorica:

Predsjednik Odbora za
diplomske ispite:

Izv.prof.dr.sc. Marija Šperac

Izv.prof.dr.sc. Mirjana Bošnjak-Klečina

*Zahvaljujem se svim svojim
učiteljima i profesorima u
životu, i o životu. Bez vas ne bi
bia ono što danas jesam.
P.S. Fala mama!*

Sažetak

Provedena je hidrološka analiza mjerenih protoka u svrhu dobivanja krivulje trajanja protoka. Izrađene su krivulje trajanja protoka za Gaussovu, Weibullovu i Log Pearson III metodu distribucije, koja je i usvojena kao mjerodavna. Glavni cilj ovog diplomskog rada bio je odrediti instalirani protok male hidroelektrane, odabrati vrstu, snagu i broj turbina, te tip i snagu agregata. Na temelju hidroloških podloga rijeke Jadro odabrana je pozicija male hidroelektrane i dat prijedlog arhitektonskog rješenja zgrade strojarnice.

Ključne riječi: protok, Log Pearson III distribucija, rijeka Jadro, turbina

Abstract

Hydrological analysis of the measured flow was analyzed for the purpose of defining the flow duration curves. Flow duration curves were made (constructed) for Gaussian, Weibull and Log Pearson III methods of distribution, where the last one is accepted as authoritative. The main objective of this diploma thesis was to determine the installed flow of a small Hydropower plant, select the type, strength and number of turbines and the type and strength of aggregate. Position of a small Hydropower plant is determined based on hydrological data of the river Jadro. A suggestion was given for architectural design of the building of the engine room.

Key words: flow, Log Pearson III distribution, river Jadro, turbine

Sadržaj

1. Uvod	5
2. Podjela hidroelektrana	6
2.1. Dijelovi hidroelektrane	10
3. Male hidroelektrane.....	13
3.1. Osnovne karakteristike malih hidroelektrana	13
3.2. Potencijal malih hidroelektrana u Hrvatskoj	14
3.3. Realizacija projekata i problemi	16
4. Karakteristike projektirane MHE na rijeci Jadro.....	17
4.1. Hidrološke karakteristike rijeke Jadro	17
4.1.1. Hidrološke podloge.....	19
4.1.2. Proračun krivulje trajanja protoka	23
4.1.3. Odabir instaliranog protoka	34
4.1.4. Odabir lokacije MHE.....	35
4.1.5. Tehničko rješenje pogona MHE	36
4.2. Karakteristike akumulacije i pada	37
4.2.1. Proračun geodetskog pada i neto pada.....	37
4.3. Energetske karakteristike MHE.....	38
4.3.1. Proračun Hidrauličke snage pozicije	38
4.3.2. Maksimalna efektivna snaga pozicije	38
4.3.3. Turbine, odabir tipa i broja turbina	39
4.3.4. Godišnja proizvodnja električne energije (E)	43
4.4. Ekološke karakteristike MHE.....	45
5. Zaključak	46
6. Grafički prilozi	47
6.1. Tlocrt zgrade strojarnice.....	47
6.2. Poprečni presjek zgrade strojarnice.....	47
7. Literatura	Error! Bookmark not defined.

Popis slika

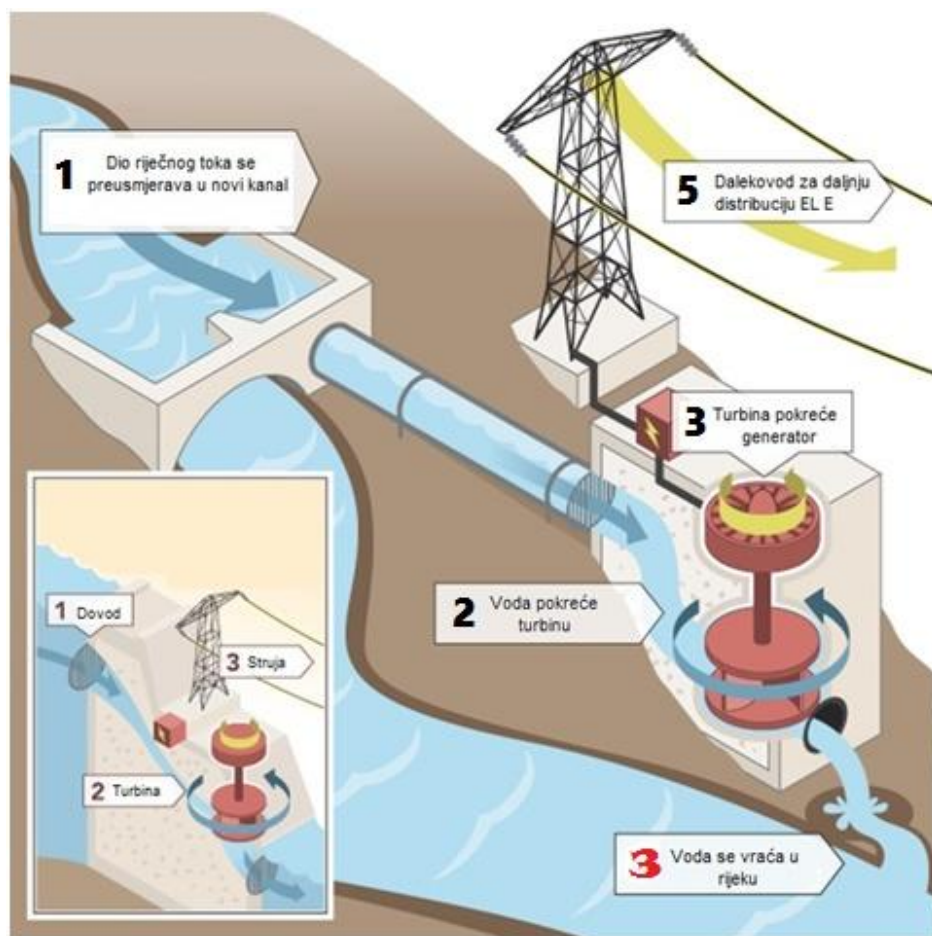
Slika 1. Proces pretvorbe energije u hidroelektrani [2].....	5
Slika 2. Shema protočne hidroelektrane [6]	7
Slika 3. Shema reverzibilne hidroelektrane [6]	8
Slika 4. Derivacijska hidroelektrana Kraljevac (P.P. HE Jug)	9
Slika 5. Dijelovi hidroelektrane [8]	10
Slika 6. Grafički prikaz udjela projekata MHE prema instaliranoj snazi [9]	15
Slika 7. Pilot projekti malih hidroelektrana u RH [10]	16
Slika 8. Tok rijeke Jadro od izvora do ušća [11]	18
Slika 9. Srednji i minimalni godišnji protoci rijeke Jadro u periodu od 1961. do 2010. [11]	18
Slika 10. Srednji dnevni vodostaji Jadrta za prosječnu godinu	19
Slika 11. Srednji dnevni protoci Jadrta za prosječnu godinu	19
Slika 12. Srednji dnevni vodostaji za period mjerenja od 1986. do 2015. godine	20
Slika 13. Srednji dnevni protoci za period mjerenja od 1986. do 2015. godine	21
Slika 14. Poprečni presjek korita hidrološke postaje Majdan [12].....	22
Slika 15. Krivulja trajanja protoka - normalna distribucija.....	25
Slika 16. Krivulja trajanja protoka - Weibullova distribucija	27
Slika 17. Krivulja trajanja protoka - Log Pearson III distribucija.....	31
Slika 18. Usporedba krivulja trajanja protoka različitih distribucija.....	32
Slika 19. Izgled odabrane krivulje trajanja protoka.....	33
Slika 20. Krivulje trajanja protoka za prosječnu, sušnu i kišnu godinu	33
Slika 21. Godišnji dijagram protoka rijeke Jadro sa instaliranim protokom i biološkim minimumom	34
Slika 22. Strojarnica nekadašnje MHE Vrilo [23].....	35
Slika 23. Izvor rijeke Jadro [25]	36
Slika 24. Proračun geodetskog pada i neto pada za derivacijsku hidroelektranu sa dovodom sa slobodnim vodnim licem [26]	37
Slika 25. Shema reakcijske i akcijske turbine [4].....	39
Slika 26. Radna područja različitih turbina [4]	40
Slika 27. Osnovni dijelovi Francis turbine [28]	41
Slika 28. Francis turbina HLF 13-WJ-84 [29].....	42
Slika 29. Promjena stupnja korisnog djelovanja (η) dvaju agregata u ovisnosti o protoku	42
Slika 30. Krivulja godišnje proizvodnje energije za 2015. godinu	44
Slika 31. Krivulja trajanja snage za 2015. godinu.....	44

Popis tablica

Tablica 1. Prednosti i mane malih HE [4]	13
Tablica 2. Osnovni podatci i mjerenja hidrološke postaje Majdan [12]	17
Tablica 3. Proračun krivulje normalne distribucije	25
Tablica 4. Rezultati srednje vrijednosti protoka, varijance, standardne devijacije i koeficijenta asimetrije normalne distribucije	25
Tablica 5. Proračun krivulje Weibullove distribucije	27
Tablica 6. Proračun logaritamskih vrijednosti protoka - Log Pearson III raspodjela	28
Tablica 7. Rezultati srednje vrijednosti logaritamske vrijednosti protoka, varijance, standardne devijacije i koeficijenta asimetrije Log Pearson III distribucije	29
Tablica 8. Koeficijenti učestalosti (K) za Log Pearson III raspodjelu [19]	30
Tablica 9. Izračunate vrijednosti koeficijenta učestalosti i protoka sa pripadajućim vjerojatnostima	30
Tablica 10. Specifikacije odabranih turbina i generatora [29]	41
Tablica 11. Proračun snage i godišnje proizvodnje energije za 2015. godinu	43

1. Uvod

Hidroelektrana (HE) je postrojenje u kojem se potencijalna energija vode najprije pretvara u kinetičku energiju njezinog strujanja, a potom u mehaničku energiju vrtnje osovine turbine, te konačno u električnu energiju u generatoru [1].



Slika 1. Proces pretvorbe energije u hidroelektrani [2]

Hidroelektranu u širem smislu čine sve građevine i postrojenja koje služe za prikupljanje vode, dovođenje i odvođenje vode (brana, zahvati, dovodni i odvodni kanali, cjevovodi itd.), pretvorbu energije (vodne turbine, generatori), transformaciju i razvod električne energije (rasklopna postrojenja, dalekovodi) te za smještaj i upravljanje cijelim sustavom [3].

2. Podjela hidroelektrana

Prema instaliranoj snazi HE se dijele na:

Velike hidroelektrane - veće od 100 MW

Srednje hidroelektrane - 10 – 100 MW

Male hidroelektrane - 0,5 – 10 MW

Mini hidroelektrane - 100 – 500 kW

Mikro hidroelektrane - 5 – 100 kW

Piko hidroelektrane - Od nekoliko stotina W do 5 kW [4]

Prema padu HE se dijele na:

1. Niskotlačne

2. Srednjetlačne

3. Visokotlačne [5]

Niskotlačne hidroelektrane grade se za specifične padove do 25 m. Pri tome je karakteristično da im cjelokupni pad stoji na raspolaganju neposredno kod elektrane, bez potrebe za tlačnim dovodima i cjevovodima. Najčešće nemaju mogućnost akumuliranja vode i upotrebljavaju se kao protočne HE za pokrivanje osnovnog opterećenja [5].

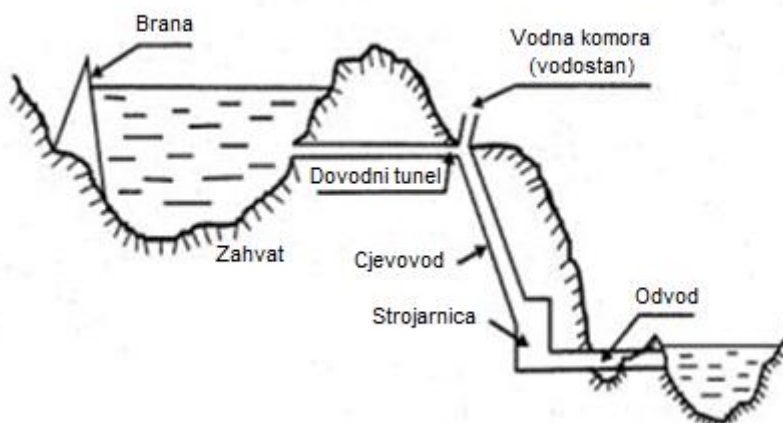
Srednjetlačne hidroelektrane grade se za padove između 25 i 200 m. Mogu biti pribranske i derivacijske, koje se najčešće grade na mjestima gdje rijeka stvara zavoj koji se tada presiječe kanalom ili cjevovodom. Najčešće se koriste Francisove turbine [5].

Visokotlačne hidroelektrane grade se u brdovitim krajevima za padove veće od 200 m. Mogu biti pribranske i derivacijske. Najčešće su derivacijske, jer su zahvat i strojarnica prostorno odijeljeni, a voda se dovodi do turbina dugačkim cjevovodom [5].

Prema načinu korištenja vode HE se dijele na:

1. Protočne
2. Akumulacijske
3. Reverzibilne

Protočne hidroelektrane koriste vodu kako dotječe. Uzvodna akumulacija protočnih hidroelektrana može se isprazniti za manje od dva sata rada nazivne snage, ili takva akumulacija uopće ne postoji. Kinetička energija se skoro direktno koristi za pokretanje turbina. Jednostavno se izvode i nemaju gotovo nikakav utjecaj na okoliš. Nedostatak im je što ovise o trenutno raspoloživom vodenom toku [5].



Slika 2. Shema protočne hidroelektrane [6]

Akumulacijske hidroelektrane koriste potencijalnu energiju akumulacijskog jezera. Mogu biti pribranske i derivacijske. Pribranske hidroelektrane smještene su ispod same brane, dok su derivacijske smještene niže i s akumulacijom su spojene cjevovodima. Dobra strana akumulacijskih HE je mogućnost akumulacije jeftinog izvora energije kad je ima u izobilju i planiranje potrošnje po potrebi. Mana ovih HE je otežan pogon ili potpuni zastoj ljeti zbog smanjenih vodenih tokova [5].

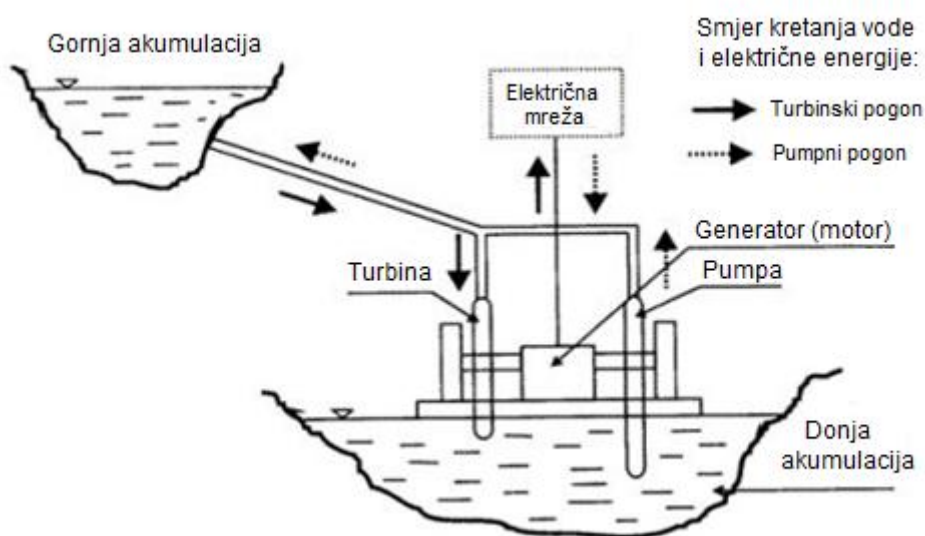
Prema veličini akumulacijskog bazena razlikuju se:

- 1) **HE s dnevnom akumulacijom** (punjenje akumulacije noću, a pražnjenje danju)
- 2) **HE sa sezonskom akumulacijom** (punjenje u kišnom, a pražnjenje u sušnom razdoblju)
- 3) **HE s godišnjom akumulacijom** (punjenje u kišnom, a pražnjenje u sušnom razdoblju)

Reverzibilne hidroelektrane imaju isti princip rada kao i ostale hidroelektrane s jednom bitnom razlikom; mogućnost vraćanja iskorištene vode iz donjega bazena ponovno u gornji bazen (akumulacijsko jezero). Voda iz gornjeg bazena ponovno se koristiti za proizvodnju energije, kada je to potrebno (u razdoblju vršne potrošnje električne energije). Reverzibilne hidroelektrane imaju dva režima pogona: *turbinski i pumpni* [6].

Zbog gubitaka energije u pumpnom režimu rada, reverzibilne hidroelektrane mogu biti veći potrošači električne energije nego proizvođači. Njihova ekonomska opravdanost proizlazi iz sljedećih razloga:

- a) ravnanje dnevne / sezone potrošnje električne energije
- b) trošenje električne energije za pumpanje u vrijeme niže tarife, te proizvodnja iste u vrijeme vršne potrošnje, odnosno više tarife [6].



Slika 3. Shema reverzibilne hidroelektrane [6]

Prema smještaju strojarnice HE se dijele na:

1. Pribranske – strojarnica je smještena neposredno uz branu
2. Derivacijske – zahvat vode i strojarnica su prostorno odijeljeni, voda se do turbina dovodi cjevovodima, dugim i do nekoliko kilometara [5]



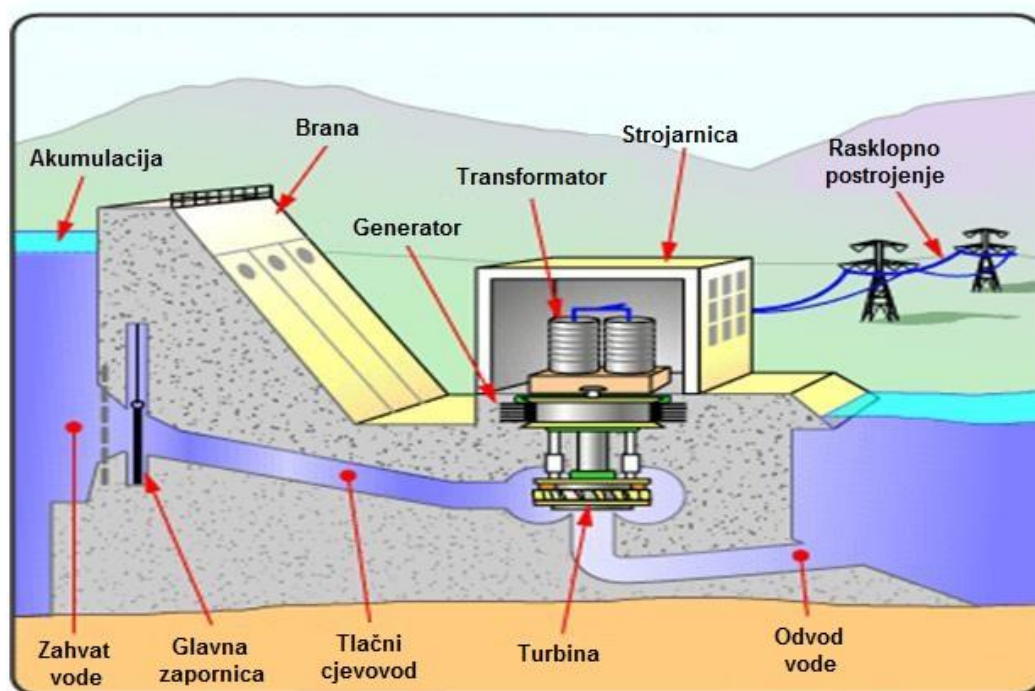
Slika 4. Derivacijska hidroelektrana Kraljevac (P.P. HE Jug)

2.1. Dijelovi hidroelektrane

Dijelovi hidroelektrane koji su u neposrednom doticaju s vodom, odnosno služe za njezino dovođenje, prikupljanje, odvođenje, te pretvorbu potencijalne energije nazivaju se zajedničkim imenom **hidrotehnički sustav (HS)**. Hidrotehnički sustav je skup različitih elemenata koji su u takvom međusobnom odnosu da daju bolji konačni rezultat od onog kojeg mogu pojedinačno dati njegovi dijelovi [7].

Osnovni dijelovi HE su:

- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| 1. Brana ili pregrada | 6. Vodene turbine |
| 2. Zahvat vode | 7. Generator |
| 3. Dovod vode | 8. Strojarnica |
| 4. Vodostan ili vodena komora | 9. Rasklopno postrojenje |
| 5. Tlačni cjevovod | 10. Odvod vode |



Slika 5. Dijelovi hidroelektrane [8]

Brana ili pregrada je osnovni dio hidrotehničkog sustava pa i cijelog postrojenja HE (često se cijelo hidroenergetsko postrojenje jednostavno naziva 'branom') i ima trostruku ulogu:

- 1) skretanje vode s njezinog prirodnog toka prema zahvatu hidroelektrane
- 2) povišenje razine vode kako bi se povećao pad
- 3) ostvarivanje akumulacije [6]

Brane se ubrajaju u najveće građevine na zemlji. Osim što se pomoću njih proizvodi električne energija, znatno smanjuju opasnost od poplava i suša. S obzirom na visinu, brane mogu biti: visoke i niske. S obzirom na izradu: masivne (npr. betonske) ili nasute (npr. zemljane, kamene). Niske se brane nazivaju i pragovima, što je čest slučaj kod malih vodotoka, odnosno kod *malih hidroelektrana* [6].

Zahvat vode prima i usmjerava vodu zadržanu u akumulaciji prema dovodu, odnosno turbini. Postoje dva tipa zahvata, zahvat na površini vode i zahvat ispod površine. Kada je pregrada niska i razina vode gotovo konstantna; izvodi se na površini, dok se ispod površine i to na najnižoj mogućoj razini izvodi u slučaju kada se razina vode tijekom godine značajno mijenja. Prolaz vode kroz zahvat se regulira zapornicama [6].

Dovod vode je dio hidrotehničkog sustava koji spaja zahvat s vodenom komorom (vodostanom). Ovisno o izgledu okolnog tla i pogonskim zahtjevima može biti: otvoren (kanal) i zatvoren (tunel), koji može biti gravitacijski ili tlačni. S gledišta elastičnosti pogona (mogućnosti odgovaranja na promjene u elektroenergetskom sustavu) tlačni su kanali povoljniji, puno elastičniji u pogonu jer bez ikakvih djelovanja mogu pratiti promjenu opterećenja [6].

Vodostan ili vodena komora predstavlja zadnji dio dovoda, a služi za odgovaranje na promjene opterećenja. Dimenzioniranje vodne komore ima velik utjecaj na pravilno funkcioniranje hidroelektrane. Kada je dovod izveden kao gravitacijski tunel mora imati odgovarajući volumen, kako bi se u njemu mogle pohraniti veće količine vode. Kod tlačnog tunela dimenzije moraju biti takve da tlak u dovodu ne poraste preko dopuštene granice ili da razina vode ne padne ispod visine ulaza u tlačni cjevovod [6].

Tlačni cjevovod dovodi vodu od vodostana do turbine. Izrađuje se o čelika ili betona (kod manjih padova), a prema smještaju može biti na površini ili u tunelu. Na ulazu u tlačni cjevovod nalazi se zaporni uređaj koji ima sigurnosnu ulogu. Zapornim uređajem se sprječava daljnji dotok vode u cjevovod, u slučaju pucanja cijevi [6].

Ispred glavnog zapornog uređaja redovito se postavlja i pomoćni, koji omogućava bilo kakve radove na glavnom bez potrebe za pražnjenjem sustava. Obilazni cjevovod je smješten na početku tlačnog i služi za njegovo postupno punjenje te za izjednačavanje tlaka ispred i iza zapornog organa. Postavljanje zapornih uređaja na dnu tlačnog cjevovoda ovisi o broju turbine koje su spojene na jedan cjevovod [6].

Vodne turbine ili hidroturbine predstavljaju središnji dio sustava jer služe za pretvaranje potencijalne energije strujanja vode u električnu energiju. Ovisno o načinu prijenosa energije vodotoka na njih, vodne turbine mogu biti: turbine slobodnog mlaza (akcijske, impulsne), te pretlačne (reakcijske) koje mogu biti radijalne i aksijalne. Turbine se često dijele i prema izvedbi, a koriste se ovisno o količini protoka vode i visini pada [6].

Generator je uređaj u kojem se mehanička energija vrtnje vratila pretvara u električnu. Može biti postavljen okomito (kod velikih hidroelektrana) ili vodoravno (kod manjih ili kada su dvije turbine spojene na jedan generator). Kod crpno-akumulacijskih hidroelektrana uz turbinu i generator na istom vratilu nalazi se i crpka pa, generator može raditi i kao motor [6].

Strojarnica je građevina u kojoj su smještene turbine, vratila, generatori te svi potrebni upravljački i pomoćni uređaji. Može biti izgrađena na otvorenom, kao samostojeća zgrada ili ukopana, u tunelu [6].

Rasklopno postrojenje predstavlja vezu hidroelektrane i elektroenergetskog sustava. Izvodi se u neposrednoj blizini strojarnice, ako to dozvoljava okolni teren [6].

Odvod vode je završni dio HS, a može biti izveden kao kanal ili kao tunel. Služi za vraćanje iskorištene vode natrag u korito vodotoka ili za dovod vode do zahvata sljedeće elektrane [6].

3. Male hidroelektrane

3.1. Osnovne karakteristike malih hidroelektrana

Mala hidroelektrana (MHE) definirana je kao hidroenergetski objekt električne snage do 10 MW (u Republici Hrvatskoj i većini zemalja EU). Ovakvo postrojenje zahtijeva prikladno područje sliva oborina te odgovarajući pad [4].

Hidroelektrane su važan energetska izvor sa stajališta zaštite okoliša budući da praktički:

- ne emitiraju CO₂
- ne emitiraju SO₂
- ne emitiraju NO_x niti bilo koji drugi tip štetnih plinova
- nema nikakvog otpada proizvodnje (čvrstog ili tekućeg) [4]

Tablica 1. Prednosti i mane malih HE [4]

Prednosti malih HE:	Mane malih HE:
Obnovljivi izvor el. energije	Ozljede i migracije riba
Nema emisije u okoliš	Utjecaj na neposredni biosustav
Smanjivanje potrošnje fosilnih goriva	Buka i vibracije: vizualno narušavanje okoliša
Kontrola plavljenja i toka	Nestalan protok: varijacije toka i mala akumulacija
Sigurnija i pouzdanija opskrba el. energijom	Izgradnja: visoki inicijalni investicijski troškovi
Stupanj djelovanja do 90%	
Mali pogonski troškovi	
Pogodne za napajanje udaljenih izoliranih područja	
Vrlo dug životni vijek i sigurnost investicije	
Pozitivan društveni utjecaj na regiju (zapošljavanje i sl.)	

Male hidroelektrane prikladne su za decentralizirana područja s malom potrošnjom te “otočni” pogon (*off-grid operation*), ali i za niskonaponske mreže i lokalne mikro mreže. Osim u vlasništvu velikih elektroprivrednih poduzeća, mogu biti i u vlasništvu manjih privatnih poduzetnika [4].

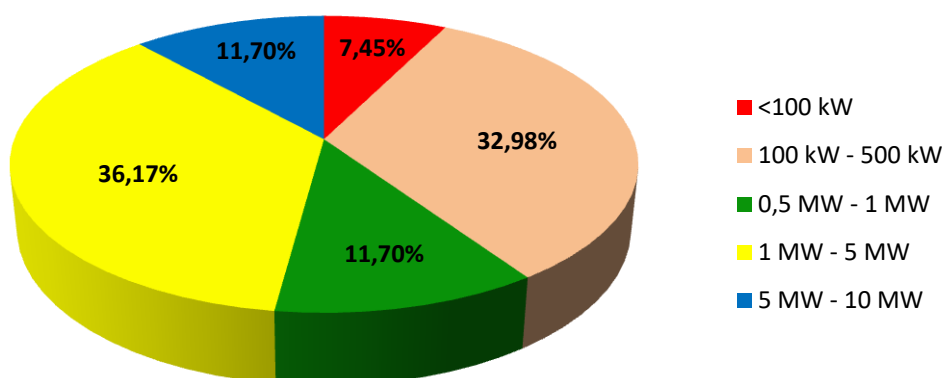
3.2. Potencijal malih hidroelektrana u Hrvatskoj

Prva sveobuhvatna procjena hidropotencijala malih hidroelektrana u Hrvatskoj objavljena je u studiji „Katastar malih vodnih snaga u SR Hrvatskoj“ davne 1985. godine. U navedenoj studiji obrađeno je 130 vodotokova i identificirano je 699 pozicija pogodnih za izgradnju MHE. Ako se razmatrane pozicije MHE podijele prema neto padu, dobije se da 90,56% razmatranih pozicija ima neto pad u granicama 0-10 m, dok ostatak od 9,44% pozicija ima neto pad veći od 10 m. Najveći broj razmatranih pozicija ima neto pad do 3 m (40,63%), a slijede pozicije sa 3-5 m neto pada (27,90%) i pozicije sa 5-10 m neto pada (22,03%). Većina razmatranih pozicija nalazi se u rasponu snage do 500 kW (88,56%), ostatak pozicija nalazi se u području od 500 kW do 5000 kW. Međutim ako se razmotre udjeli u ukupnoj instaliranoj snazi uočljivo je da projekti od 500 kW do 5000 kW čine 56,86% ukupne instalirane snage, dok projekti do 500 kW čine 43,14% ukupne instalirane snage [9].

Ministarstvo gospodarstva rada i poduzetništva 2007 godine osniva Registar projekata i postrojenja za korištenje obnovljivih izvora energije i kogeneracije te povlaštenih proizvođača (Registar OIEKPP) [9].

U Registru OIEKPP prijavljena su za dobivanje statusa povlaštenog proizvođača 94 projekta MHE ukupne instalirane snage 191,24 MW. Pri tome najveći udio projekata MHE čine:

- 1) MHE u razredu od 1 do 5 MW 36,17%,
- 2) MHE u razredu od 100 do 500 kW s udjelom od 32,98%,
- 3) MHE u razredima od 500 kW do 1 MW (11,70%) i 5 do 10 MW (11,70%);
- 4) MHE instalirane električne snage manje od 100 kW prisutne su s udjelom od 7,45% [9]



Slika 6. Grafički prikaz udjela projekata MHE prema instaliranoj snazi [9]

Ukupne planirane snage po županijama u Republici Hrvatskoj su:

- 1) Šibensko-kninska županija s iznosom od 65,75 MW (34,38%)
- 2) Karlovačka županija s iznosom od 40,72 MW (21,29%)
- 3) Splitsko-dalmatinska županija s iznosom od 30,36 MW (15,88%)
- 4) Ličko-senjska županija s iznosom od 15,636 MW (8,18%)
- 5) Zadarska županija s iznosom od 14,251 MW (7,45%) [9]

Prema podacima Registra OIEKPP trenutno su u pogonu samo dvije MHE instalirane snage 0,04 MW koje imaju status povlaštenog proizvođača električne energije, što predstavlja 0,0078% ukupno prijavljenih postrojenja. Razlog tome su prije svega komplicirani proces pripreme i izgradnje MHE, te nedorečenosti u zakonodavstvu. Proces pripreme i izgradnje MHE uvjetovan je društvenim, gospodarskim, pravnim, ekološkim, tehničko-tehnološkim i drugim čimbenicima [9].

Projekt SMART (*Strategies to promote small scale hydroelectricity production in Europe*) ukazuje na značajne barijere za veću primjenu MHE u Europi, zbog složenosti zakonskih i administrativnih procedura. Glavni zadatak projekta je dati jasan doprinos u otklanjanju tih nedostataka nizom korisnih alata za nacionalne, regionalne i lokalne donositelje odluka [9].

3.3. Realizacija projekata i problemi

Mogućnost realizacije projekata izgradnje malih hidroelektrana prvenstveno je određena zakonskom regulativom, te situacijom na terenu. Određeni zakonski akati iziskuju ishođenje 67 različitih dokumenata iz više institucija, što zahtijeva i značajne troškove. Dodatna komplikacija proizlazi iz repliciranja nekih podloga i dokumenata [4].

Procedura je ista za objekt od 10 kW kao i za objekt od 10 MW. Procjena vremenskog opsega procedure (od ideje do realizacije) je 5 do 7 godina. Procedura za male HE je kompliciranija nego za ostale obnovljive izvore, jer uključuje i ishođenje dodatnog paketa dozvola i suglasnosti vezanih uz korištenje vodnih resursa (vodopravni uvjeti, vodopravna suglasnost, koncesija za korištenje voda i javnog vodnog dobra, vodopravna dozvola) [4].



Slika 7. Pilot projekti malih hidroelektrana u RH [10]

4. Karakteristike projektirane MHE na rijeci Jadro

4.1. Hidrološke karakteristike rijeke Jadro

Rijeka Jadro teče od svog izvora u podnožju Mosora kroz aluvijalnu dolinu i grad Solin. U more se ulijeva u Vranjičkom zaljevu, a ukupna dužina toka je 4.3 km. Kroz urbano područje grada Solina tok rijeke račva se u više rukavaca, koji se nizvodno vraćaju u glavno korito rijeke. Topografski sliv rijeke Jadro je malen obuhvaća oko 22 km², no stvarni hidrološki sliv je znatno veći. Složenost podzemnih tokova i veličina sliva osiguravaju kontinuitet ovog izvora tijekom cijele godine. Izvor se nalazi na 34.2 m.n.m., a prihranjuje se podzemnim vodama iz karbonatnog zaleđa. Na samom izvoru zahvaća se voda za vodoopskrbu Splita već 1700 godina, a danas i za susjedne gradove - Solin, Kaštela i Trogir [11].

Za praćenje protoka koji ostaju u koritu rijeke Jadro, nakon zahvaćanja voda za vodoopskrbu, koriste se podatci s hidrološke postaje Vidovića most (1949.-1983.) i **Majdan** (od 1984.). Stanica Vidovića most bila je smještena na istoimenom mostu (km 2+650). Nešto uzvodnije od mosta nalazi se stanica Majdan koja je danas u funkciji (km 3+150) [11].

Tablica 2. Osnovni podatci i mjerenja hidrološke postaje Majdan [12]

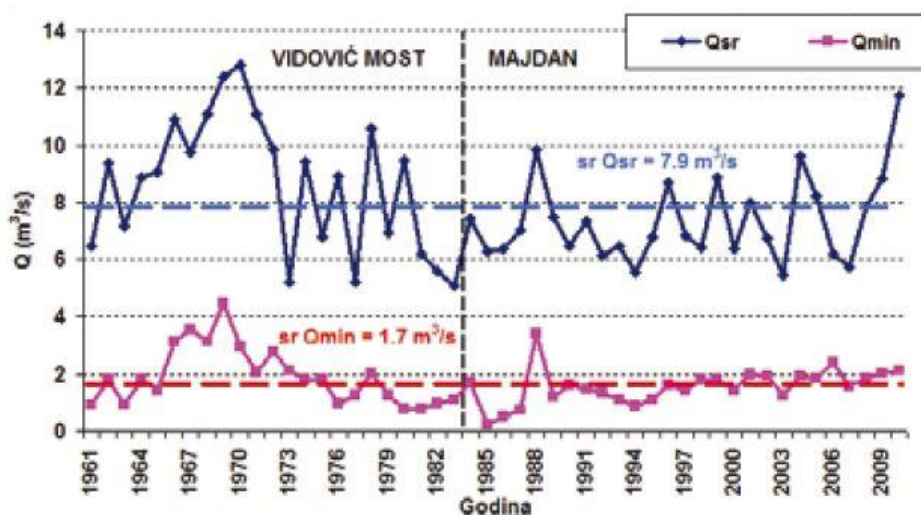
IME	Majdan
ŠIFRA	7221
TIP POSTAJE	Automatska dojava
VODOTOK	Jadro
SLIV	Jadranski sliv
PORJEČJE	Porječje južnog Jadrana
POČETAK RADA	16.06.1983. godine
KOTA NULE VODOKAZA (m.n.m.)	13.456
VRSTA MJERENJA	INFO
VODOSTAJ	Razdoblje: 1983. - 2015. Minimum: 16. 11. 1985. 17 cm Maksimum: 20. 2. 1987. 175 cm
PROTOK	Razdoblje: 1983. - 2015. Minimum: 16. 11. 1985. 0,219 m ³ /s Maksimum: 13. 11. 1997. 78,13 m ³ /s
VODOMJERENJA	Broj mjerenja: 116
PROFILI	Broj mjerenja: 2

Rijeka Jadro prihvaća nekoliko manjih i dva veća pritoka – Poklinovac i Rupotina. Na uzvodnom dijelu toka na stacionaži km 3+550 rijeka Jadro prima desni prtok Poklinovac, bujični tok s povremenim tečenjem. Drugi značajan prtok je bujica Rupotina koja se nalazi na stacionaži km 2+000 i ulijeva se na čvorištu Šljukica. Radi se o bujičnom vodotoku koji u kišnom dijelu godine prihranjuje tok rijeke Jadro, donoseći značajne količine nanosa. U ljetnom razdoblju korito bujice Rupotina je uglavnom suho, bez dotoka u korito rijeke [11].



Slika 8. Tok rijeke Jadro od izvora do ušća [11]

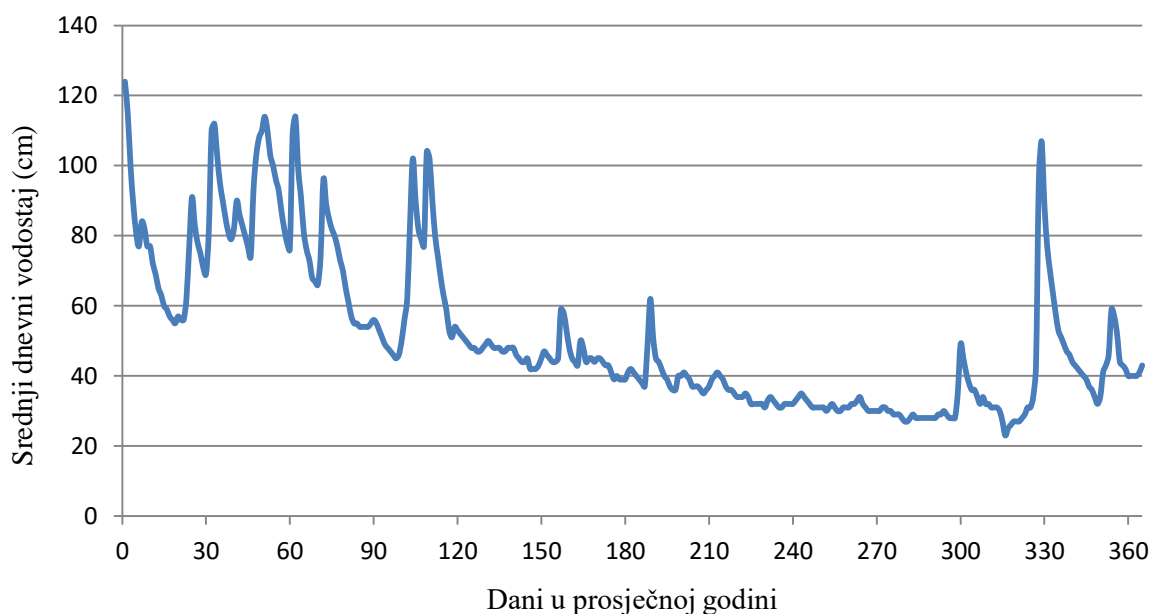
Prosječni godišnji protok (1961. - 2010. god.) na hidrološkoj postaji Majdan je $7.9 \text{ m}^3/\text{s}$, najveći srednji godišnji protok bio je $12.8 \text{ m}^3/\text{s}$, a najmanji $5.1 \text{ m}^3/\text{s}$. Unutar godine postoji značajna varijacija protoka. Tako su najveći protoci od XI do III. mjeseca, s prosjecima većim od $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Najmanji srednji mjesečni protoci su u ljetnom tromjesečju [11].



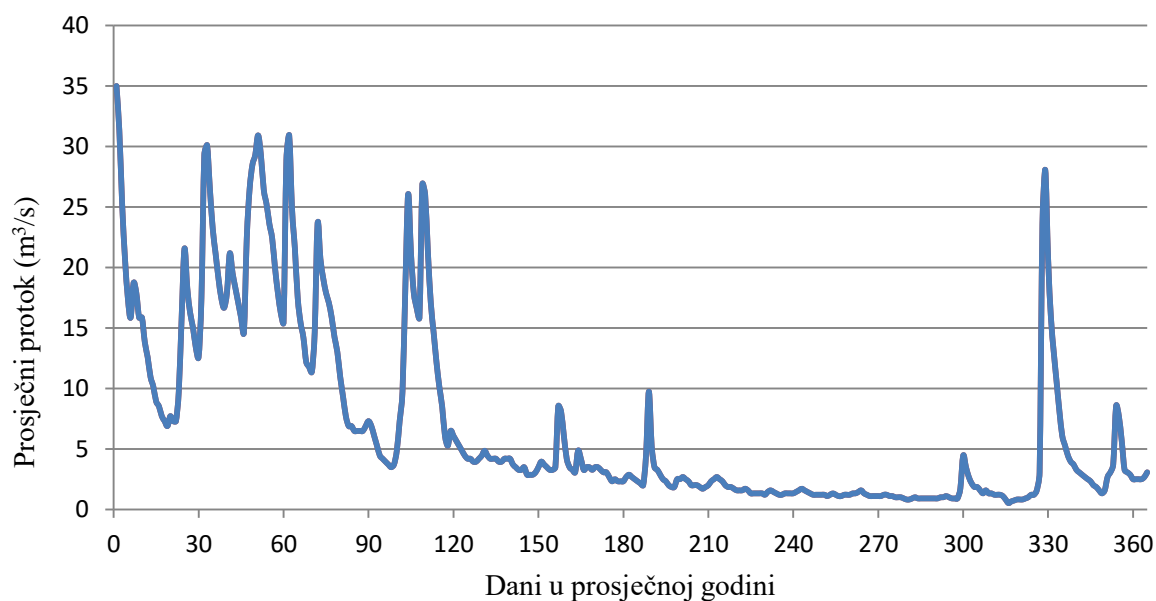
Slika 9. Srednji i minimalni godišnji protoci rijeke Jadro u periodu od 1961. do 2010. [11]

4.1.1. Hidrološke podloge

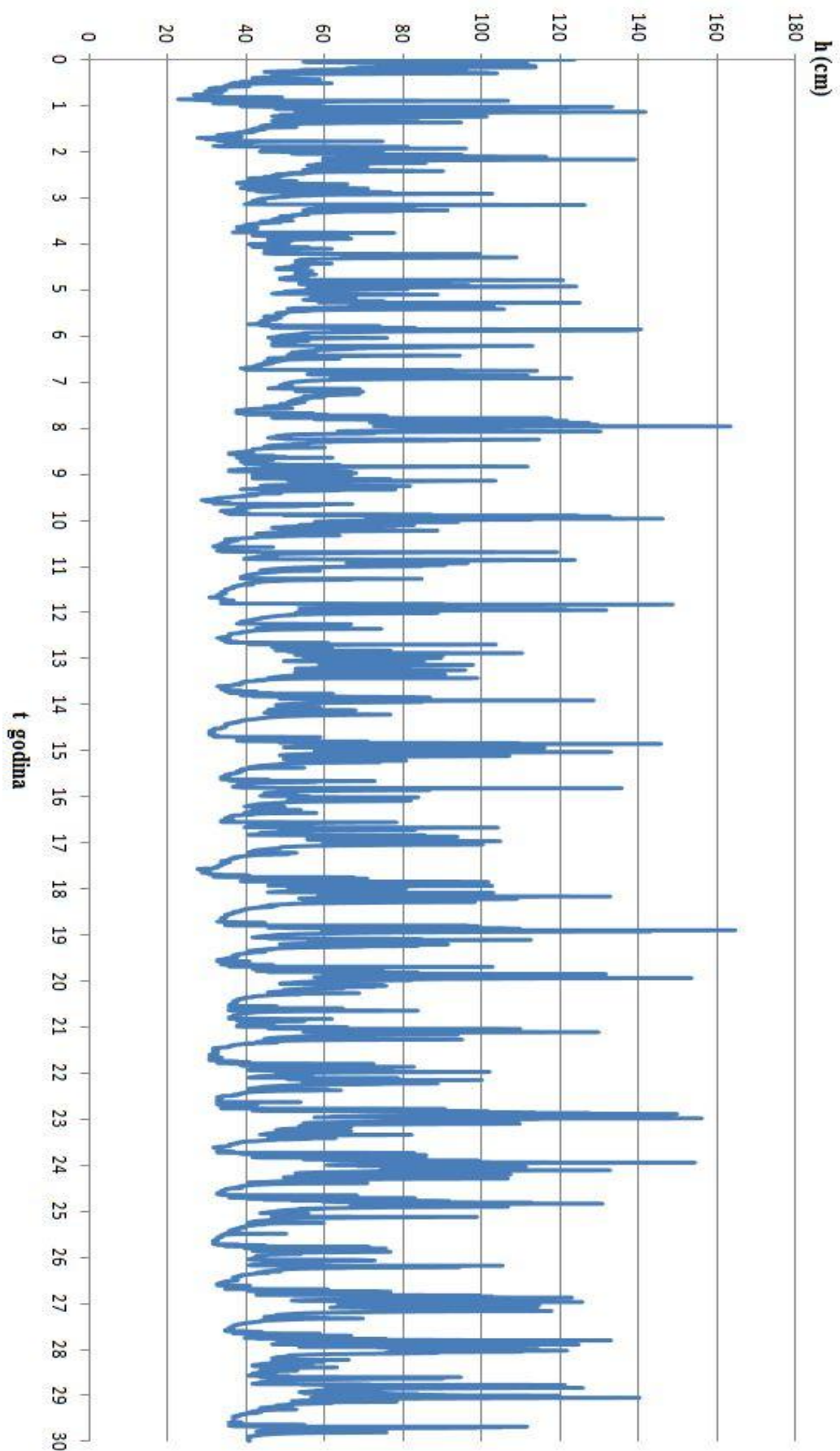
Hidrološka stanica Majdan smještena je 1650 metara nizvodno od izvora rijeke Jadro. Temeljem dnevnih mjerenja od 1986. do 2015. godine rijeka Jadro ima prosječni godišnji vodostaj i prosječni godišnji protok, kako je prikazano na slikama 10. i 11.



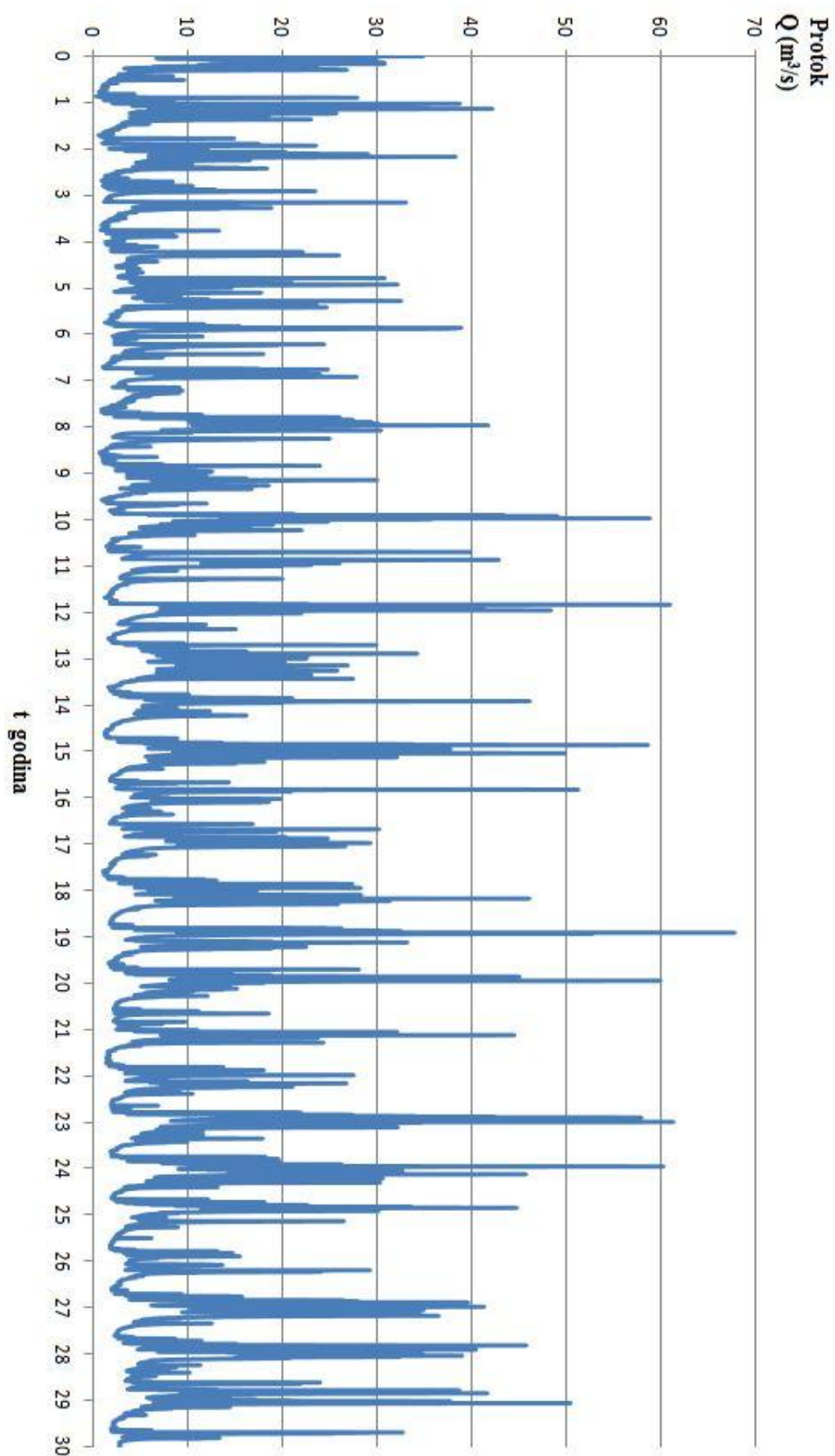
Slika 10. Srednji dnevni vodostaji Jadra za prosječnu godinu



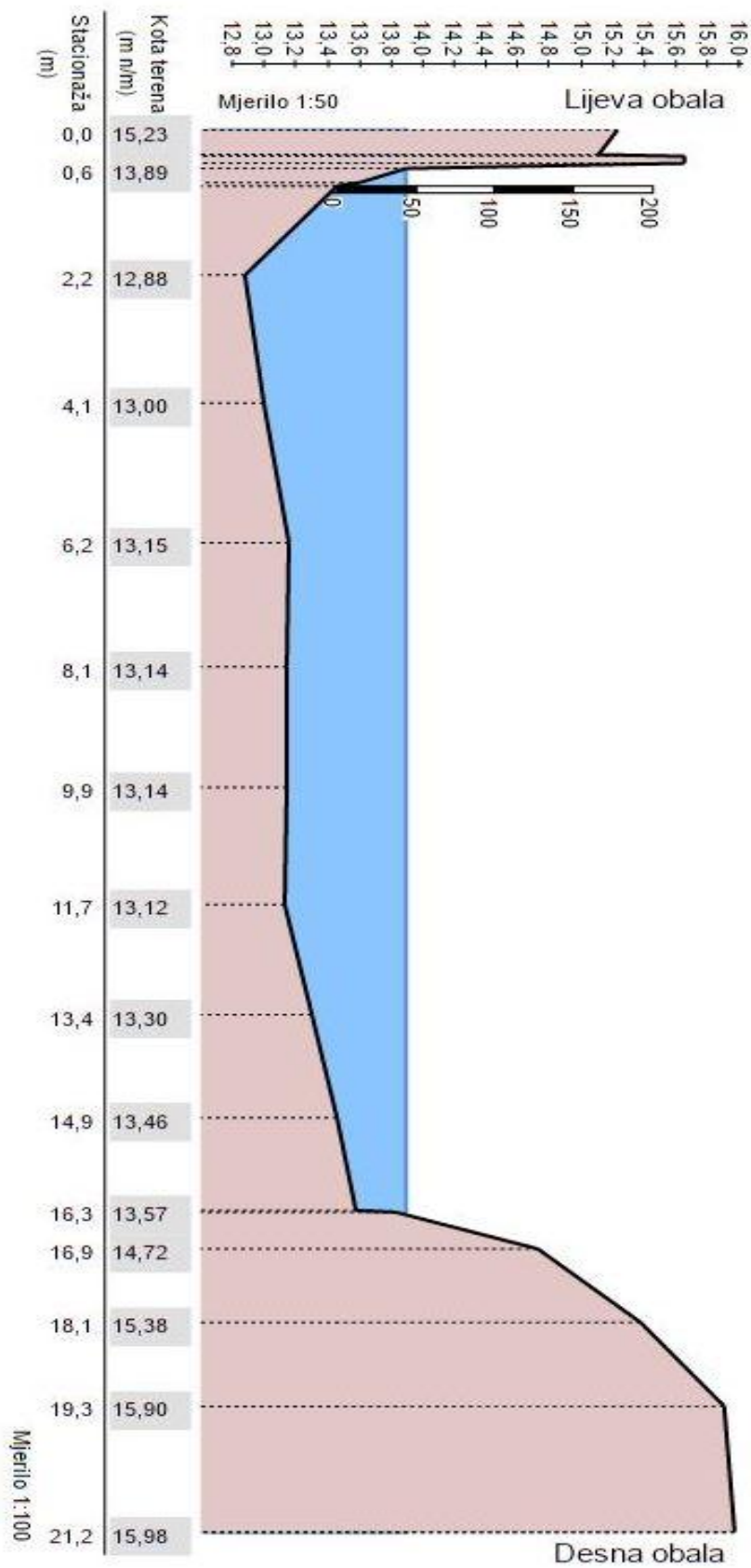
Slika 11. Srednji dnevni protoci Jadra za prosječnu godinu



Slika 12. Srednji dnevni vodostaji za period mjerenja od 1986. do 2015. godine



Slika 13. Srednji dnevni protoci za period mjerenja od 1986. do 2015. godine



Slika 14. Poprečni presjek korita hidrološke postaje Majdan [12]

Šifra: 7221
Postaja: MAJDAN
Vodotok: JADRO

Kota nule: 13,456 m n/m
Vodostaj: 44 cm
Datum mjerenja: 8. 7. 2014.

4.1.2. Proračun krivulje trajanja protoka

Krivulja trajanja protoka jest krivulja koja pokazuje postotak vremena ili broj dana u godini, tijekom kojih je vodostaj ili protok jednak danim količinama, ili veći od njih bez obzira na kronološki slijed [13].

Krivulja trajanja protoka, posebice u hidroenergetici je jedna od najvažnijih hidroloških podloga jer predstavlja osnovu za definiranje moguće snage vodotoka. Kod detaljnih analiza raspoloživih dotoka za upotrebu, uz prosječnu krivulju trajanja protoka važni su pokazatelji i krivulje trajanja protoka za pojedine karakteristične godine iz razmatranog razdoblja: prosječnu, vlažnu i sušnu godinu. U takvim se slučajevima u literaturi preporučuju neprekidna motrenja i mjerenja hidroloških veličina najmanje 25, a još bolje 30 godina [13].

Nagib krivulje trajanja ovisi o vrsti ulaznih podataka: jesu li protoci srednji dnevni, srednji mjesečni ili srednji godišnji. Najispravnije je primjenjivati krivulje trajanja određene na osnovi srednjih dnevnih protoka. Krivulje trajanja srednjih dnevnih protoka za prosječnu godinu, konstruirane na osnovi podataka iz višegodišnjega razdoblja redovito su zaglađene. Prema tome, krivulje trajanja definirane na osnovi podataka iz dugih vremenskih nizova moguće je dobro aproksimirati teorijskim krivuljama raspodjela s najviše tri parametra [13].

Da bi se dobili što točniji rezultati i preciznije krivulje trajanja protoka, u ovom radu obrađeni su rezultati i konstruirane krivulje sljedećih distribucija:

- Normalne distribucije
- Weibullove distribucije
- Log Pearson III distribucije

Dobivene rezultate potrebno je usporediti, te odabrati metodu s najrealnijim rješenjima kao mjerodavnu. Kasnije se cijeli proračun vrši prema odabranoj metodi distribucije.

Sve metode distribucija proračunate su pomoću Microsoft Excel programa i njegovih formula. U nastavku je izdvojen dio proračuna za svaku distribuciju pojedinačno.

Gaussova (normalna) distribucija

Normalna distribucija najviše se koristi u statističkoj teoriji i primjeni. Teorija je pokazala da ona vrlo dobro opisuje pokuse čiji su ishodi posljedica sume mnogo međusobno nezavisnih i jednako distribuiranih utjecaja [14].

Za neprekidnu slučajnu varijablu kažemo da ima Gaussovu ili normalnu distribuciju s parametrima μ i σ^2 ako je njezina funkcija gustoće dana izrazom:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad x \in \mathbb{R} \quad [14]$$

gdje su μ i σ^2 realni brojevi i $\sigma > 0$

Vrijednosti funkcije distribucije za slučajne varijable moraju se računati korištenjem metoda numeričkog integriranja s obzirom da se integrali uglavnom ne daju riješiti eksplicitno. Funkcija distribucije standardne normalne slučajne varijable definirana je izrazom [14]:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad x \in \mathbb{R} \quad [14]$$

U današnje se vrijeme za računanje vjerojatnosti po normalnoj distribuciji najčešće koriste naprednija džepna računala ili specijalizirani software na računalu [14].

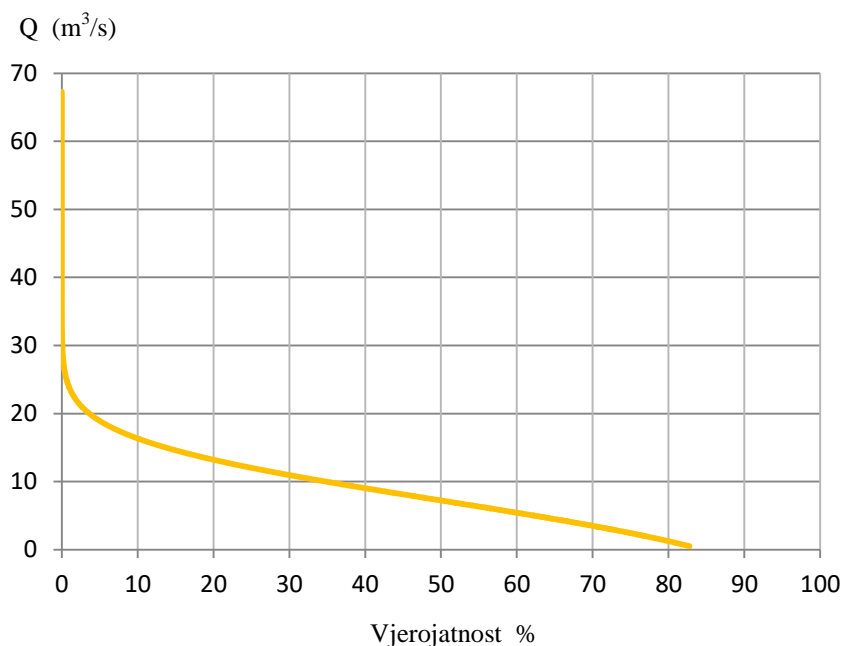
Prilikom proračuna u Microsoft Excelu za parametre μ i σ^2 koristimo srednju vrijednost protoka, tj. njegovu standardnu devijaciju.

Tablica 3. Proračun krivulje normalne distribucije

Q_{\max} (m ³ /s)	Normalna distribucija		Vjerojatnost 1- f(x)*100
	f(x) = NORMDIST(Q_{\max} ; sr.vrij., st.dev)	1- f(x)	
67,290	1,000000000000000	0,000000000000000	0,000000000000000
61,040	0,999999999999998	0,000000000000002	0,000000000000184
60,930	0,999999999999998	0,000000000000002	0,000000000000208
60,240	0,999999999999996	0,000000000000004	0,000000000000436
59,180	0,999999999999987	0,000000000000013	0,000000000001338
58,730	0,999999999999979	0,000000000000021	0,000000000002139
⋮			
0,900	0,18626459980406	0,81373540019594	81,37354001959370
0,851	0,18442186133795	0,81557813866206	81,55781386620550
0,815	0,18307526564449	0,81692473435551	81,69247343555120
0,759	0,18099278958584	0,81900721041416	81,90072104141560
0,732	0,17999406346518	0,82000593653482	82,00059365348170
0,655	0,17716489799160	0,82283510200840	82,28351020084030

Tablica 4. Rezultati srednje vrijednosti protoka, varijance, standardne devijacije i koeficijenta asimetrije normalne distribucije

Srednja vrijednost	7,2368
Varijanca	50,4956
St. devijacija	7,1060
Koef. asimetrije	2,3848



Slika 15. Krivulja trajanja protoka - normalna distribucija

Weibullova distribucija

Weibullova 3-parametarska distribucija zadana je izrazom:

$$F(t; \alpha, \beta, \eta) = \begin{cases} 1 - e^{-\left(\frac{t-\alpha}{\eta}\right)^\beta}, & t > \alpha \\ 0, & t \leq \alpha \end{cases} \quad [15]$$

F – kumulativna funkcija distribucije vjerojatnosti

t – uzorak koji se sastoji od n opažanja slučajne varijable $T \sim W(\alpha, \beta, \eta)$

α – parametar položaja (engl. the location parameter)

η – parametar skaliranja (engl. the scale parameter)

β – parametar oblika (engl. the shape parameter) [15]

Weibullova 3-parametarska distribucija je vrlo fleksibilna. Dobrim izborom parametara oblika β mogu se dobiti različiti oblici funkcije gustoće vjerojatnosti [15].

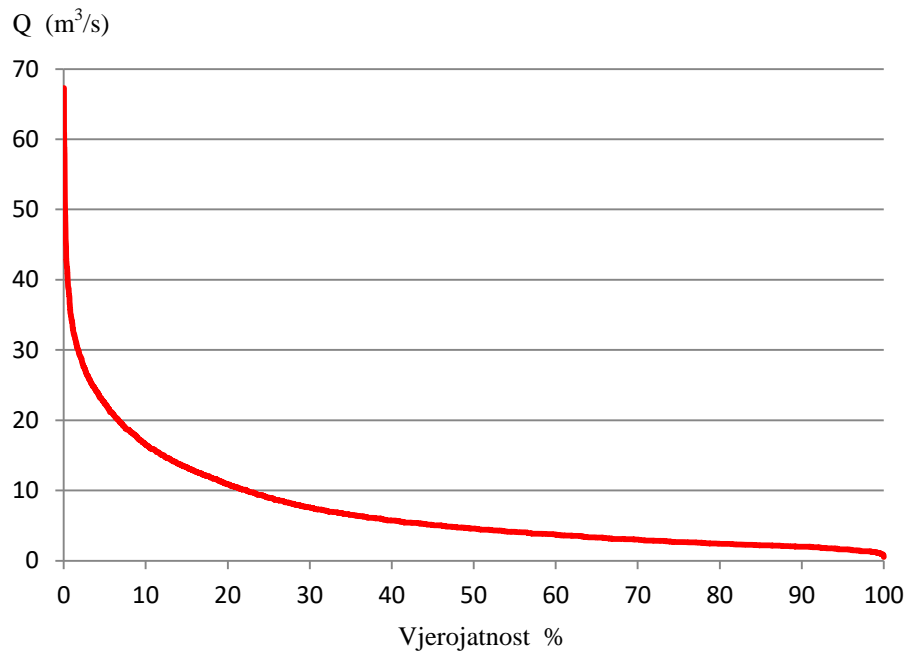
U svrhu boljeg razumijevanja mogućnosti primjene Weibullova modela korisno je navesti osnove iz teorije pouzdanosti. Najjednostavnije rečeno pouzdanost nekog sustava je vjerojatnost da će taj sustav uspješno, bez otkaza obaviti zadaću koja mu je namijenjena [15].

Funkcija pouzdanosti (engl. reliability function ili survivor function) $R(t)$ definira se kao vjerojatnost bezotkaznog rada do vremenskog trenutka t , odnosno vjerojatnost da će određeni element ili uređaj nadživjeti trenutak t . Za funkciju pouzdanosti koriste se i nazivi funkcija preživljavanja i funkcija opstanka. Uočimo da za Weibullovu 3-parametarsku distribuciju funkcija pouzdanosti glasi:

$$R(t; \alpha, \beta, \eta) = 1 - F(t; \alpha, \beta, \eta) = e^{-\left(\frac{t-\alpha}{\eta}\right)^\beta}, t > \alpha \quad [15]$$

Tablica 5. Proračun krivulje Weibullove distribucije

Q_{\max} (m ³ /s)	Weibull $R(t; \alpha, \beta, \eta)$
67,290	0,0091258
61,040	0,0182515
60,930	0,0273773
60,240	0,0365030
59,180	0,0456288
58,730	0,0547545
57,980	0,0730060
	•
	•
	•
0,900	99,8813652
0,851	99,8904910
0,815	99,9452455
0,759	99,9634970
0,732	99,9726227
0,655	99,9817485
0,517	99,9908742



Slika 16. Krivulja trajanja protoka - Weibullova distribucija

Log Pearson III distribucija

Log Pearson III distribucija računa se pomoću sljedeće jednadžbe:

$$\log Q_{T_r} = \text{avg}(\log Q) + [K(T_r, C_s)] \cdot \sigma \log Q$$

$$\sigma \log Q = \sqrt{\text{varijanca}} \quad [16]$$

$\log Q$ – logaritamska vrijednost protoka

$\log Q_{T_r}$ – logaritamska vrijednost protoka za pripadajuću vjerojatnost

$\text{avg}(\log Q)$ – srednja vrijednost logaritamske vrijednosti protoka

K – koeficijent učestalosti

C_s – koeficijent asimetrije

$\sigma \log Q$ – standardna devijacija logaritamske vrijednosti protoka [16]

Tablica 6. Proračun logaritamskih vrijednosti protoka - Log Pearson III raspodjela

Log Pearson III			
Q_{\max} (m ³ /s)	$\log Q$	$(\log Q - \text{avg}(\log Q))^2$	$(\log Q - \text{avg}(\log Q))^3$
67,290	1,8279505	1,2587214	1,4121941
61,040	1,7856145	1,1655179	1,2582832
60,930	1,7848312	1,1638271	1,2555462
60,240	1,7798850	1,1531795	1,2383556
59,180	1,7721750	1,1366800	1,2118736
58,730	1,7688600	1,1296225	1,2006046
57,980	1,7632782	1,1177886	1,1817878
•			
•			
•			
0,900	-0,0457575	0,5651739	-0,4248867
0,851	-0,0700704	0,6023210	-0,4674574
0,815	-0,0888424	0,6318110	-0,5022047
0,759	-0,1197582	0,6819146	-0,5631123
0,732	-0,1354889	0,7081423	-0,5959102
0,655	-0,1837587	0,7917115	-0,7044504
0,517	-0,2865095	0,9851207	-0,9777643

Srednji dnevni protoci (Q_{\max}) sortirani su po veličini, od najvećeg. Izračunata je logaritamska vrijednost protoka ($\log Q$), pomoću koje se dalje računa njena srednja vrijednost, varijanca, standardna devijacija, te koeficijent asimetrije c_s . Za dobivenu vrijednost koeficijenta asimetrije c_s , iz *tablice 8.* odabiremo koeficijente učestalost K_1 i K_2 . Koeficijenti učestalosti dani su za povratne periode od 1 do 200 godina, uz pripadajuće im vjerojatnosti.

Tablica 7. Rezultati srednje vrijednosti logaritamske vrijednosti protoka, varijance, standardne devijacije i koeficijenta asimetrije Log Pearson III distribucije

Srednja vrijednost (\bar{x})	0,70602300
Varijanca	0,12411835
St. Devijacija	0,35230435
Koef. asimetrije (c_s)	0,42874020

Koeficijent asimetrije c_s izračunat je pomoću Microsoft Office Excel funkcije SKEW (skew – eng. asimetrija). Funkcija SKEW vraća asimetriju razdiobe, obilježava stupanj asimetrije razdiobe oko njezine sredine [17].

Pearsonova mjera asimetrije

Pearsonova mjera asimetrije temelji se na odnosima aritmetičke sredine, medijana i moda. U pravilu se izračunava za kontinuirano numeričko obilježje. Ako se izračunava za diskretno obilježje, mjeru je potrebno interpretirati s oprezom ili zaključak o asimetriji temeljiti na drugim mjerama asimetrije [18].

$$S_k = \frac{\bar{x} - M_o}{\sigma}, \quad S_k = \frac{3(\bar{x} - M_e)}{\sigma}$$

$$-3 \leq S_k \leq 3 \quad [18]$$

\bar{x} – srednja vrijednost varijable

S_k – Pearsonova mjera asimetrije

M_o – mod

M_e – medijan

σ – standardna devijacija [18]

Tablica 8. Koeficijenti učestalosti (K) za Log Pearson III raspodjelu [19]

Cs	Recurrence Interval In Years							
	1,0101	2	5	10	25	50	100	200
	Percent Chance (\geq) = 1-F							
	99	50	20	10	4	2	1	0,5
1,5	-1,256	-0,240	0,690	1,333	2,146	2,743	3,330	3,910
1,4	-1,318	-0,225	0,705	1,337	2,128	2,706	3,271	3,828
1,3	-1,383	-0,210	0,719	1,339	2,108	2,666	3,211	3,745
1,2	-1,449	-0,195	0,732	1,340	2,087	2,626	3,149	3,661
1,1	-1,518	-0,180	0,745	1,341	2,066	2,585	3,087	3,575
1	-1,588	-0,164	0,758	1,340	2,043	2,542	3,022	3,489
0,9	-1,660	-0,148	0,769	1,339	2,018	2,498	2,957	3,401
0,8	-1,733	-0,132	0,780	1,336	1,993	2,453	2,891	3,312
0,7	-1,806	-0,116	0,790	1,333	1,967	2,407	2,824	3,223
0,6	-1,880	-0,099	0,800	1,328	1,939	2,359	2,755	3,132
0,5	-1,955	-0,083	0,808	1,323	1,910	2,311	2,686	3,041
0,4	-2,029	-0,066	0,816	1,317	1,880	2,261	2,615	2,949
0,3	-2,104	-0,050	0,824	1,309	1,849	2,211	2,544	2,856
0,2	-2,178	-0,033	0,830	1,301	1,818	2,159	2,472	2,763
0,1	-2,252	-0,017	0,836	1,292	1,785	2,107	2,400	2,670
0	-2,326	0	0,842	1,282	1,751	2,054	2,326	2,576
-0,1	-2,400	0,017	0,846	1,270	1,716	2,000	2,252	2,482
-0,2	-2,472	0,033	0,850	1,258	1,680	1,945	2,178	2,388
-0,3	-2,544	0,050	0,853	1,245	1,643	1,890	2,104	2,294
-0,4	-2,615	0,066	0,855	1,231	1,606	1,834	2,029	2,201
-0,5	-2,686	0,083	0,856	1,216	1,567	1,777	1,955	2,108

Tablica 9. Izračunate vrijednosti koeficijenta učestalosti i protoka sa pripadajućim vjerojatnostima

Vjerojatnost	Povratni period	K1($c_1=0.5$)	K2($c_2=0.4$)	K	logQ	Q(m ³ /s)
99	1	-1,955	-2,029	-2,0077	-0,0013	0,9970
50	2	-0,083	-0,066	-0,0709	0,6810	4,7979
20	5	0,808	0,816	0,8137	0,9927	9,8332
10	10	1,323	1,317	1,3187	1,1706	14,8121
4	25	1,910	1,880	1,8886	1,3714	23,5176
2	50	2,311	2,261	2,2754	1,5076	32,1844
1	100	2,686	2,615	2,6354	1,6345	43,1010
0,5	200	3,041	2,949	2,9754	1,7543	56,7916

Proračun koeficijenta učestalosti (K) i logaritamske vrijednosti protoka ($\log Q$) računa se prema sljedećim jednadžbama:

$$K = K_1 + \frac{(c_s - c_1) \cdot (K_2 - K_1)}{c_2 - c_1}$$

$$\log Q = \bar{x} + (K \cdot SD) = \bar{x} + \left(K \cdot \sqrt{\frac{\sum |x - \bar{x}|^2}{n}} \right) \quad [16]$$

K – koeficijent učestalosti

K_1 – gornja vrijednost koeficijenta K

K_2 – donja vrijednost koeficijenta K

c_s – koeficijent asimetričnosti

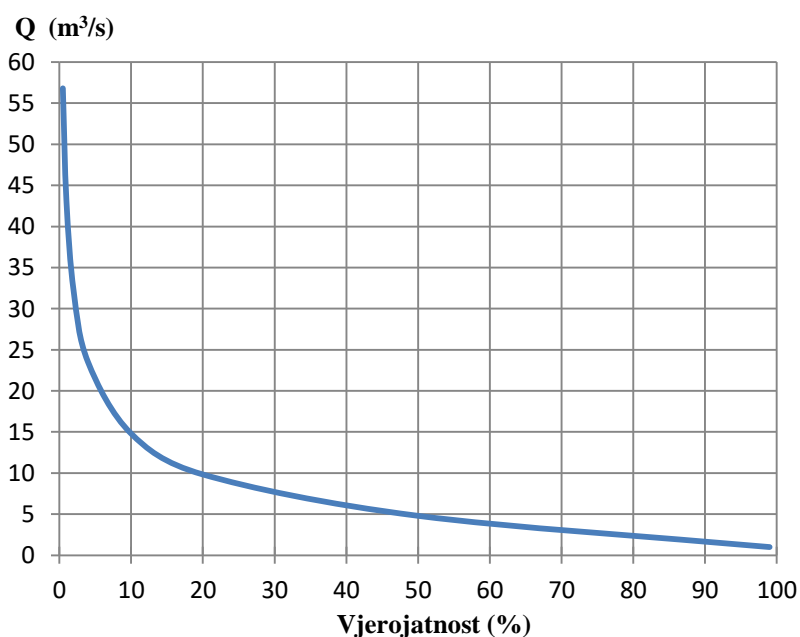
c_1 – vrijednost koeficijenta asimetrije za K_1

c_2 – vrijednost koeficijenta asimetrije za K_2

x – varijabla

\bar{x} – srednja vrijednost varijable

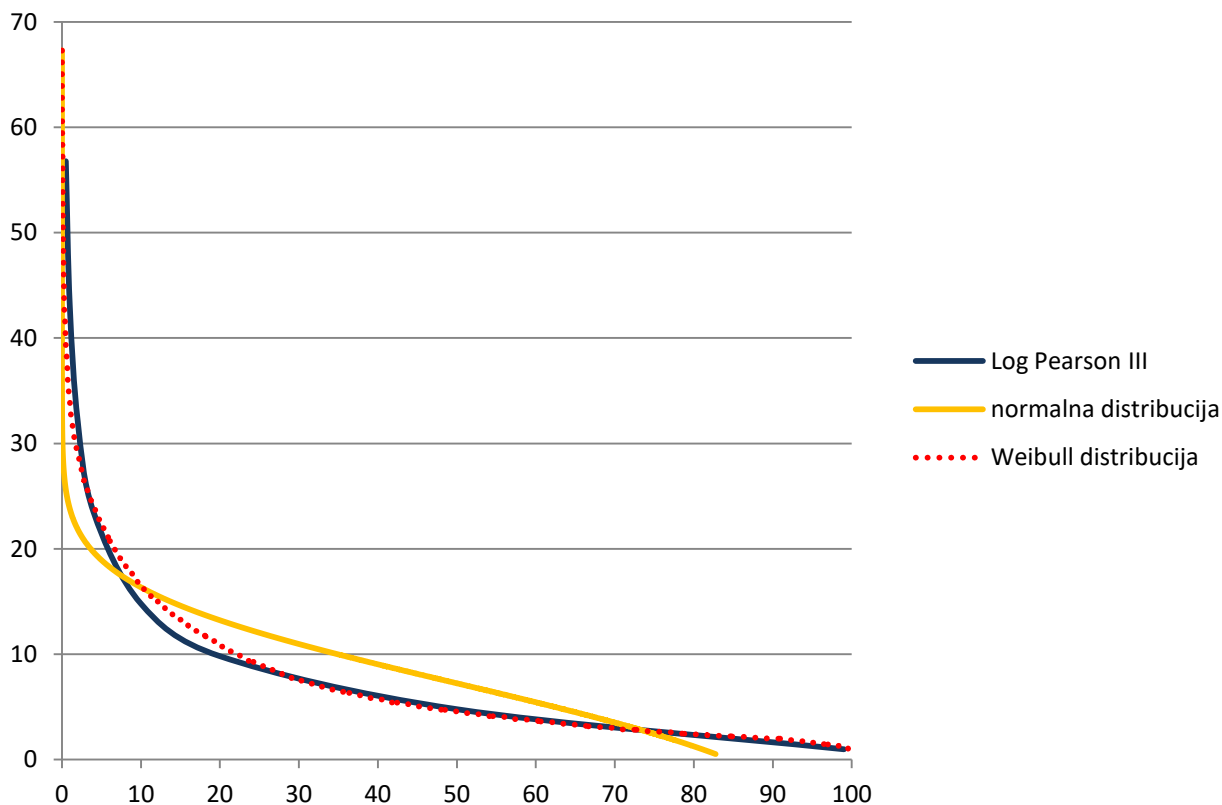
n – broj podataka [16], [20]



Slika 17. Krivulja trajanja protoka - Log Pearson III distribucija

Usporedba dobivenih rezultata

Krivulje trajanja protoka

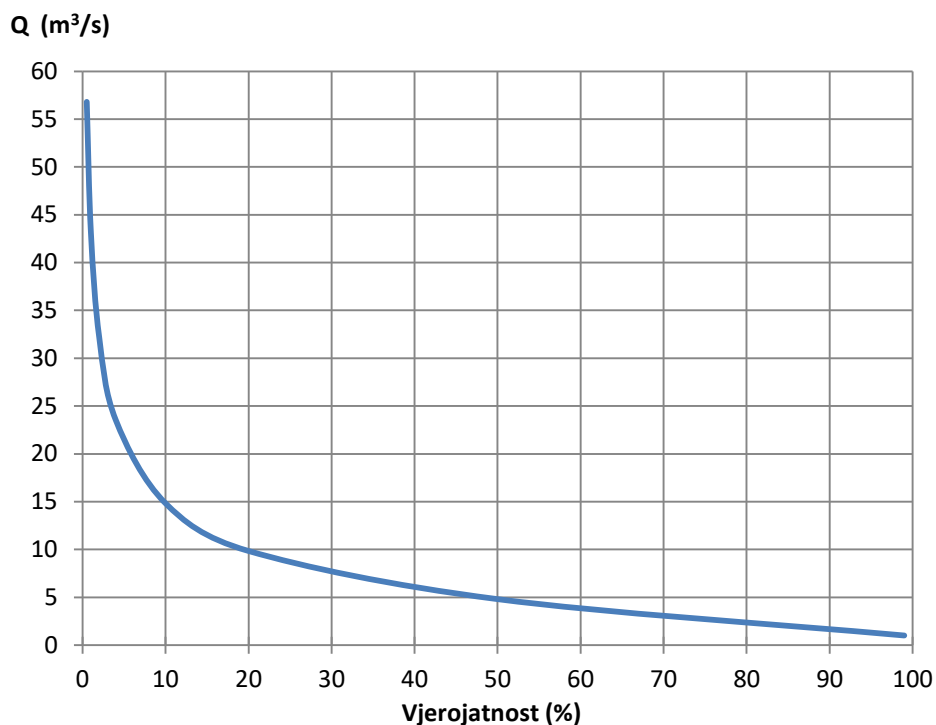


Slika 18. Usporedba krivulja trajanja protoka različitih distribucija

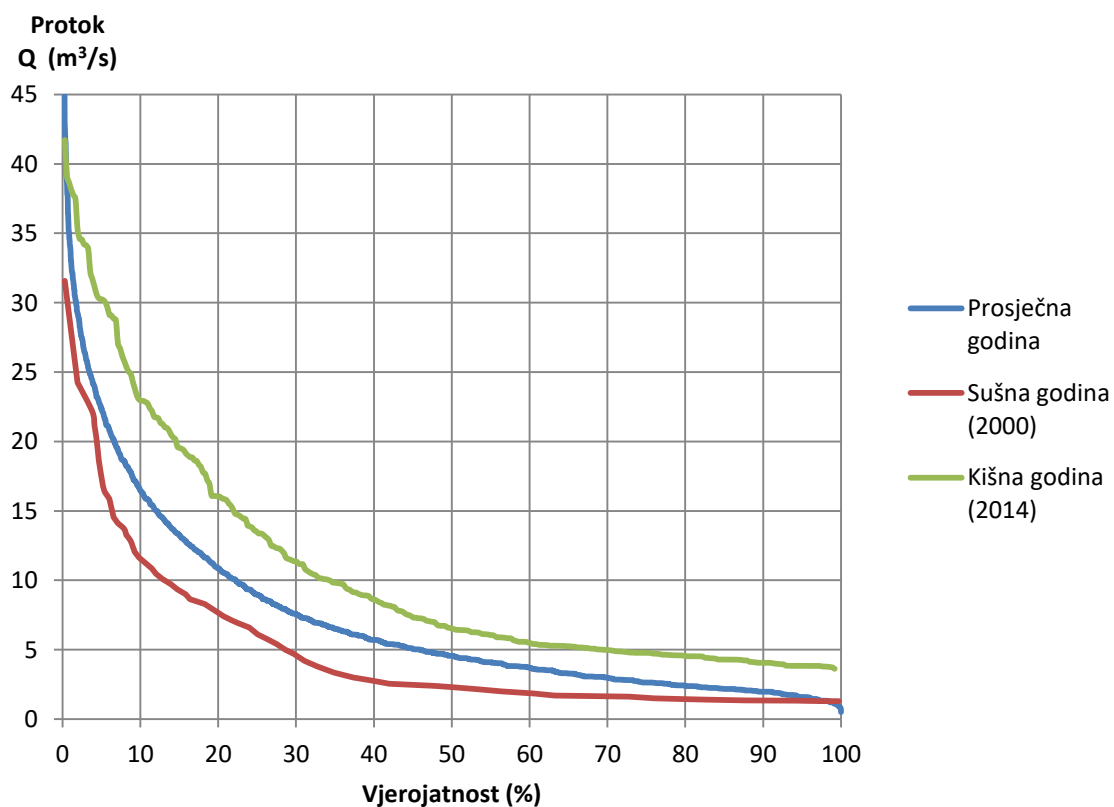
Na slici 18. vidljivo je kako normalna distribucija ne daje adekvatan oblik krivulje tj. dobre rezultate, zbog čega se neće koristiti u proračunu. Weibullova i Log Pearson III distribucija daju približno isti oblik krivulje.

Odabrana je **Log Pearson III distribucija**, jer ima nešto zaglađeniji oblik krivulje, i nešto niže vrijednosti protoka s vjerojatnošću pojave od 10 do 30%, što više odgovara stvarnoj situaciji na terenu.

U ovom radu razmatranja su usmjerena na krivulje trajanja protoka definiranih na osnovi srednjih dnevnih protoka hidrološke postaje „Majdan – 7221“, za period od 30 godina (1986. – 2015. g.).



Slika 19. Izgled odabrane krivulje trajanja protoka



Slika 20. Krivulje trajanja protoka za prosječnu, sušnu i kišnu godinu

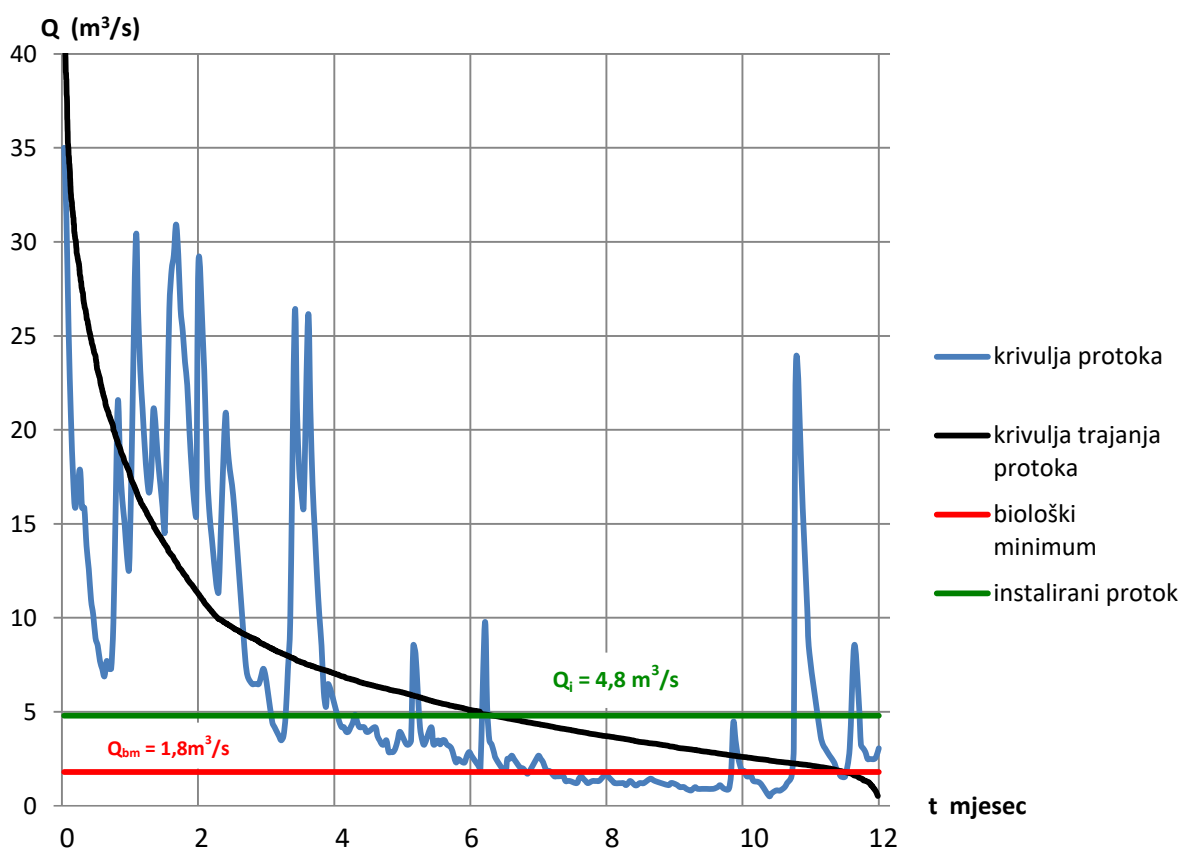
4.1.3. Odabir instaliranog protoka

Na predmetnoj poziciji srednji protok iznosi $Q_{sr} = 4,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Uobičajeno je uzeti instalirani protok (maksimalni protok kroz sve turbine) u granicama od $(1,2 \div 1,4) \times Q_{sr}$. To znači da bi se na ovoj poziciji instalirani protok mogao kretati u granicama od $4,8 \text{ m}^3/\text{s}$ do $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$. Odabran je $Q_i = 4,8 \text{ m}^3/\text{s}$ [21].

Prema krivulji trajanja protoka instalirani ili veći protok trajat će 48% dana u godini ili 4205 sati. Preostalo vrijeme kroz turbine će protjecati manji protok [21].

Biološki minimum

Ekipa stručnjaka Građevinskog fakulteta u Splitu izradila je 1996. godine studiju o biološkom minimumu, gdje je usvojeno da minimalni protok Jadra u koritu mora biti $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$. U projektu se gore navedeni protok usvaja kao mjerodavan biološki minimum $Q_{bm} = 1,8 \text{ m}^3/\text{s}$ [22].



Slika 21. Godišnji dijagram protoka rijeke Jadro sa instaliranim protokom i biološkim minimumom

4.1.4. Odabir lokacije MHE

Nova hidroelektrana „IGIT“ bit će smještena 170 metara nizvodno od izvora rijeke Jadro. Prethodna hidrološka obilježja ukazuju na znatan potencijal ove pozicije. Postoji dobro očuvana protočna infrastruktura stare hidroelektrane Vrilo, koja je izgrađena 1908. godine za potrebe tvornice cementa „10 Kolovoz“ (Majdan). Hidroelektrana Vrilo i tvornica cementa Majdan izvan pogona su od 1998., odnosno 2008. godine.

Kako se u prošlosti na ovoj lokaciji nalazila tvornica cementa, već postoji prometna infrastruktura, kao i dobre mogućnosti za priključak na elektroenergetski sustav. Temeljem navedenog, promatrana pozicija je idealna za smještaj postrojenja male hidroelektrane.



Slika 22. Strojarnica nekadašnje MHE Vrilo [23]

4.1.5. Tehničko rješenje pogona MHE

Za novo postrojenje koristit će se protočna infrastruktura starog postrojenja, modificirana prema zahtjevima moderne male derivacijske hidroelektrane.

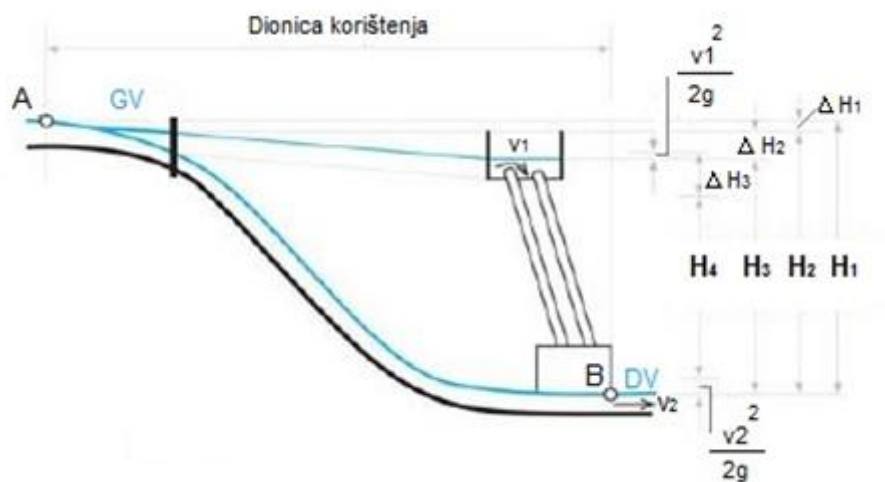
Instalirani protok MHE je $Q_i = 4,8 \text{ m}^3/\text{s}$, a neto pad koji će se koristiti na turbini iznosi 16,75 m. Zahvat vode za MHE potrebno je izvršiti na samom izvoru rijeke Jadro dovodnim kanalom. Postojeći dovodni kanal je otvorenog tipa i u dobrom stanju. Ukupna dužina kanala je 170 m, širina 4,20 m, a visine zidova 1,90 m. Prosječni uzdužni pad iznosi 1,60%. U području bunara, na lijevoj strani dovodnog kanala nalazi se bočni preljev, kojim se evakuira višak vode iz dovodnog kanala [24]. Voda se preljevnim kanalom odvodi u područje odvodnog kanala MHE. Zgrada strojarnice je veličine 15 x 15 m i visine 12 m. Ima ukupno dvije etaže, od kojih je druga predviđena za smještaj i relaksaciju zaposlenika.



Slika 23. Izvor rijeke Jadro [25]

4.2. Karakteristike akumulacije i pada

4.2.1. Proračun geodetskog pada i neto pada



Slika 24. Proračun geodetskog pada i neto pada za derivacijsku hidroelektranu sa dovodom sa slobodnim vodnim licem [26]

H_1 – bruto pad dionice

H_2 – bruto pad elektrane

H_3 – koncentrirani pad

$H_4 = H_n$ – neto pad koji se koristi na turbini [26]

ΔH_1 – gubitak na padu u uspornom području

ΔH_2 – gubitak na padu u derivaciji

ΔH_3 – gubitak na padu u strmom dovodu [26]

$$H_2 = GV - DV = H_A - H_B = 33,45 \text{ m} - 15,85 \text{ m} = 17,60 \text{ m}$$

$$H_3 = H_2 - \Delta H_2 = 17,60 \text{ m} - 0,33 \text{ m} = 17,27 \text{ m}$$

$$H_4 = H_3 - \left(\Delta H_3 - \frac{v_1^2}{2g} + \frac{v_2^2}{2g} \right) = 17,27 - \left(0,5 - \frac{0,62^2}{19,62} + \frac{0,15^2}{19,62} \right) = 16,75 \text{ m}$$

4.3. Energetske karakteristike MHE

4.3.1. Proračun Hidrauličke snage pozicije

Hidraulička snaga neke pozicije je snaga koja se može ostvariti u idealnim uvjetima na toj poziciji. Hidraulička snaga je teoretski pokazatelj vrijednosti te pozicije. Računa se prema izrazu:

$$P_h = \rho \times g \times H_n \times Q_i = 1000 \times 9,81 \times 16,75 \times 4,8 = 788\,724 \text{ W} = 788,72 \text{ kW} \quad [21]$$

P_h – hidraulička snaga pozicije

ρ – gustoća vode

g – sila gravitacije

H_n – neto pad koji se koristi na turbini

Q_i – instalirani protok

4.3.2. Maksimalna efektivna snaga pozicije

Hidraulička se snaga umanjuje za uobičajene vrijednosti iskoristivosti navedenih strojeva:

- iskoristivost turbina 96%
- iskoristivost multiplikatora 97%
- iskoristivost generatora 97%
- iskoristivost transformatora 98% [21]

$$P_{ef} = P_h \times \eta_t \times \eta_m \times \eta_g \times \eta_{tr} = 788,72 \times 0,96 \times 0,97 \times 0,97 \times 0,98 = 701,96 \text{ kW}$$

P_{ef} – maksimalna efektivna snaga pozicije

P_h – hidraulička snaga pozicije

η_t – iskoristivost turbina

η_m – iskoristivost multiplikatora

η_g – iskoristivost generatora

η_{tr} – iskoristivost transformatora [21]

4.3.3. Turbine, odabir tipa i broja turbina

Funkcija turbine je transformacija kinetičke energije vode u mehaničku energiju rotirajućih dijelova turbine. Postoji mnogo različitih tipova turbina kako bi se pokrio široki raspon uvjeta koji proizlaze iz konfiguracije terena, odnosno različitih kombinacija protoka i pada.

U velikom broju slučajeva turbine koje se koriste kod malih hidroelektrana su umanjene verzije turbina koje se koriste u konvencionalnim velikim hidroelektranama [4].

Izbor tipa, oblika i dimenzija turbine prvenstveno ovisi o:

- Neto padu
- Instaliranom (projektiranom) protoku
- Brzini vrtnje, koja određuje tip i osnovni oblik rotora turbine i ostalih dijelova
- Brzini pobjega: najveća brzina koja se može postići bez priključenog električnog opterećenja
- Troškovima izgradnje male hidroelektrane [4]

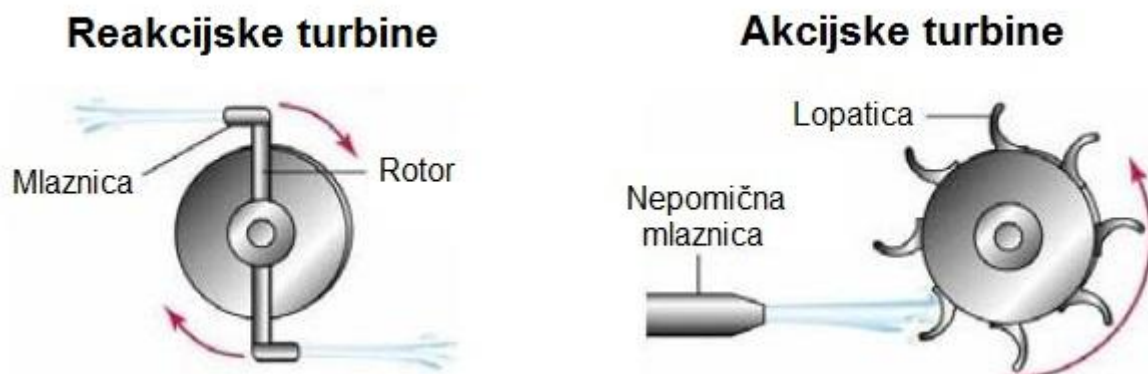
Klasifikacija turbina

Reakcijske turbine:

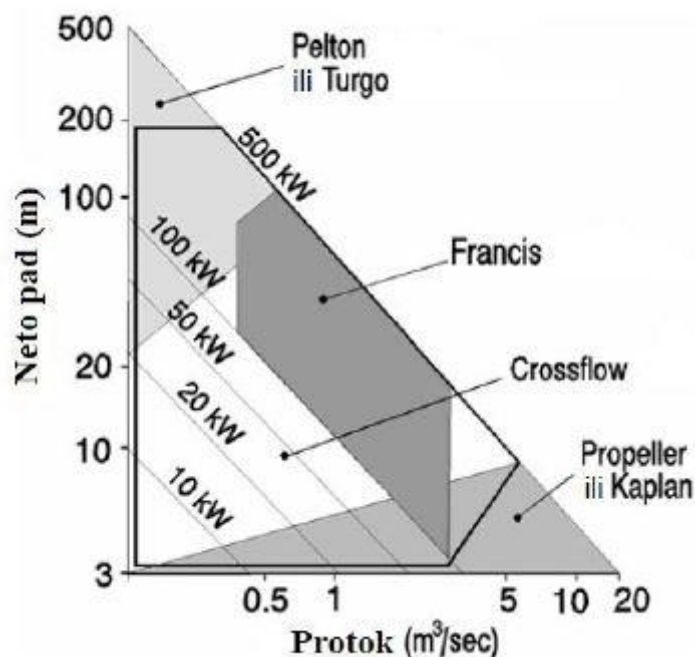
- Snaga proizlazi iz pada tlaka na turbini
- Potpuno uronjena u vodu
- Obodna brzina se pretvara u snagu osovine
- Propelerna, Francisova i Kaplanova turbina

Akcijske turbine:

- Pretvaraju kinetičku energiju vode tako da mlaznice pogađaju lopatice
- Nema pada tlaka na turbini
- Peltonova, Turgo i Crossflow turbina [4]



Slika 25. Shema reakcijske i akcijske turbine [4]



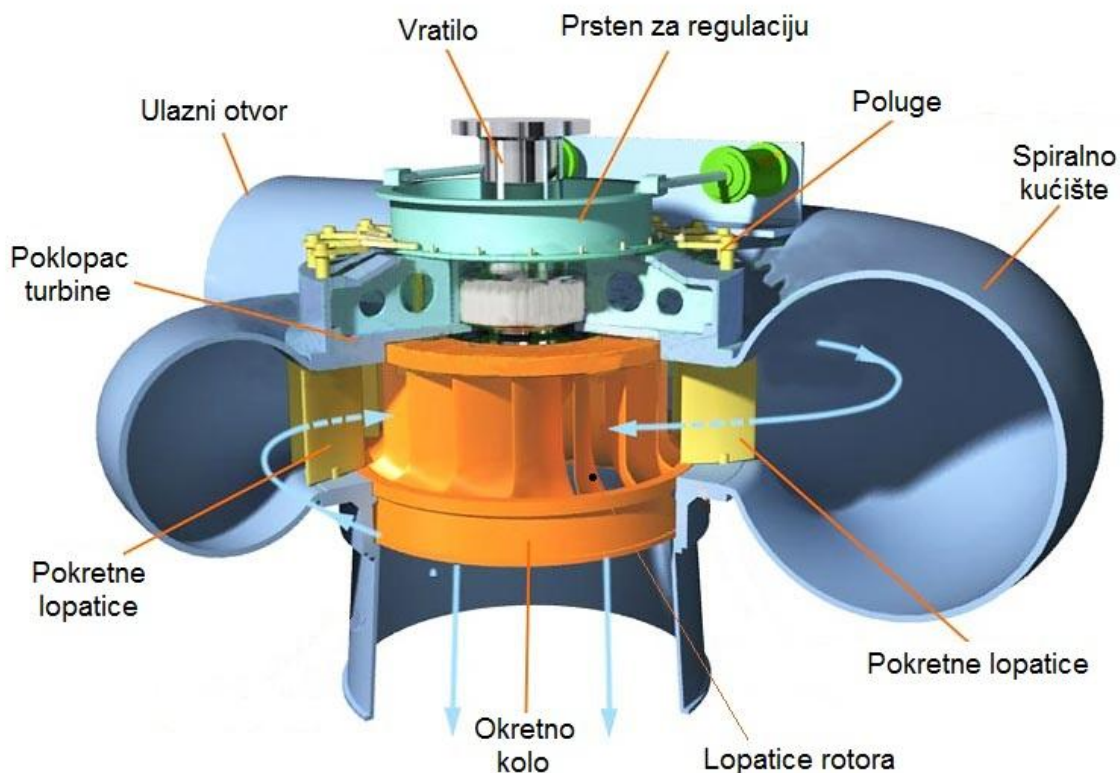
Slika 26. Radna područja različitih turbina [4]

Francisova turbina

S obzirom na opći tok strujanja vode Francisova turbina je radijalni tip turbine, što znači da se voda kreće okomito na osovinu (vratilo). To je reakcijski (pretlačni) tip turbine, čije osnovne dijelove čine stator s nepokretnim i sprovedno kolo s pokretnim lopaticama, te rotor (okretno kolo) koji rotira s osovinom turbine. Iznad i ispod rotora postoji razlika u tlaku. Voda ulazi između lopatica sprovednog kola u rotor, gdje se dio neto pada hidroelektrane pretvara u brzinu, a ostali dio pada djeluje kao tlak na rotor. Unutrašnjost vode ispunjena je vodom i zbog pretlaka nastaje ubrzanje, te voda koja izlazi izaziva reakciju i okreće rotor. Francis turbine mogu biti postavljene tako da su povezane s generatorom na horizontalnoj ili vertikalnoj osovini. Visoka efikasnost $\eta = 0.96$ (kod suvremenih izvedbi) [27].

Francis turbine se koriste kod:

- Padova od 15 do 700 metara
- Srednjih brzina protoka [4]



Slika 27. Osnovni dijelovi Francis turbine [28]

Odabrane su dvije horizontalne Francis turbine HLF 13-WJ-84 i trofazni generator SFW400-16 kineskog proizvođača *Foshan Xin Yi Hydropower Equipment Co., Ltd.* čije se specifikacije vide u tablici 10.

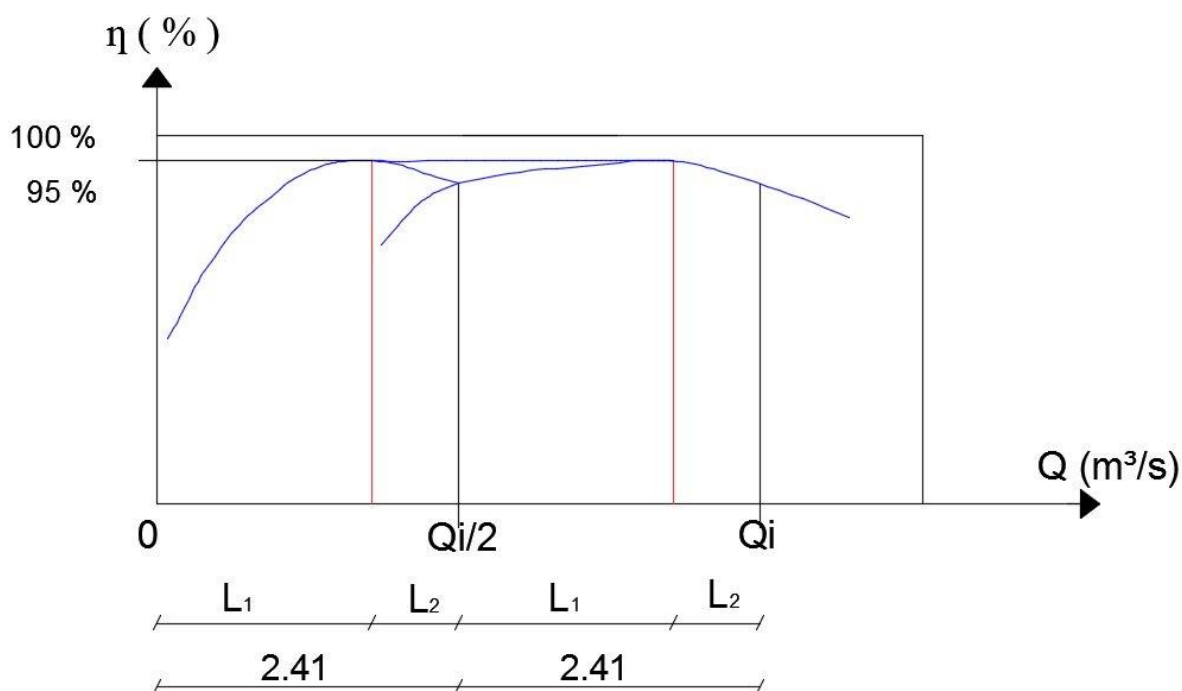
Tablica 10. Specifikacije odabranih turbina i generatora [29]

FRANCIS TURBINA HLF 13-WJ-84	
Tip turbine	Spiralna Francis turbina s horizontalnim vrat.
Konstruktivni neto pad	17 m
Nazivni protok kroz turbinu	4,82 m ³ /s (2 x 2,41 m ³ /s)
Nazivna brzina vrtnje	375 o/min
Nazivna snaga turbine	451 kW
GENERATOR SFW400-16	
Tip generatora	Trofazni
Nazivna brzina vrtnje	375 o/min
Nazivna snaga generatora	400 kW



Slika 28. Francis turbina HLF 13-WJ-84 [29]

Velika prednost kineskih proizvođača turbinskih agregata osim cijene je izgradnja višepolnih generatora manjih snaga, čime se izbjegava primjena multiplikatora. Uzme li se u obzir kvaliteta proizvoda i dugogodišnja garancija, model HLF 13-WJ-84 čini se idealnim izborom.



Slika 29. Promjena stupnja korisnog djelovanja (η) dvaju agregata u ovisnosti o protoku

4.3.4. Godišnja proizvodnja električne energije (E)

U proračunu je preko srednjih mjesečnih protoka i pripadajućeg stupnja djelovanja turbine (η) određena mjesečna proizvodnja električne energije. Godišnja proizvodnja električne energije računa se prema formuli:

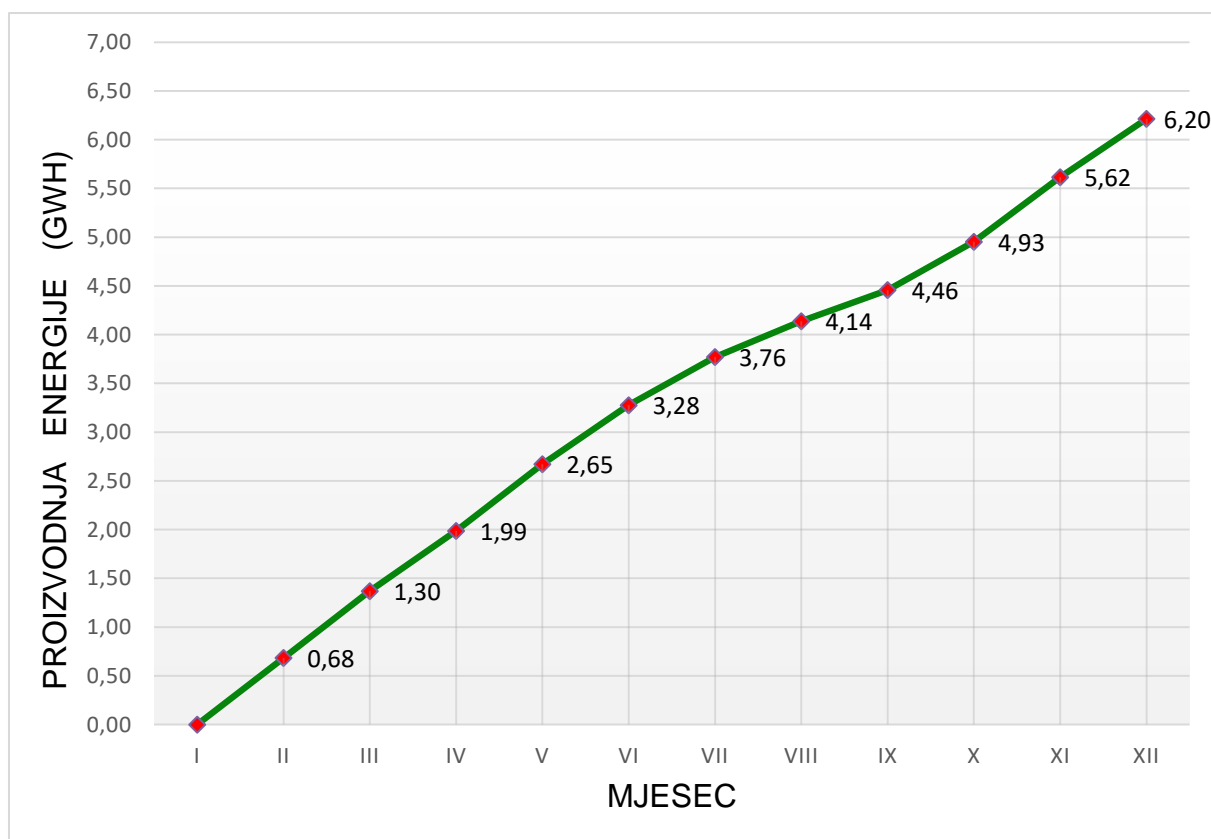
$$E = P_{ef} \times t$$

$$E = 701,96 \text{ kW} \times 24 \text{ h/dan} \times 365 \text{ dana/god}$$

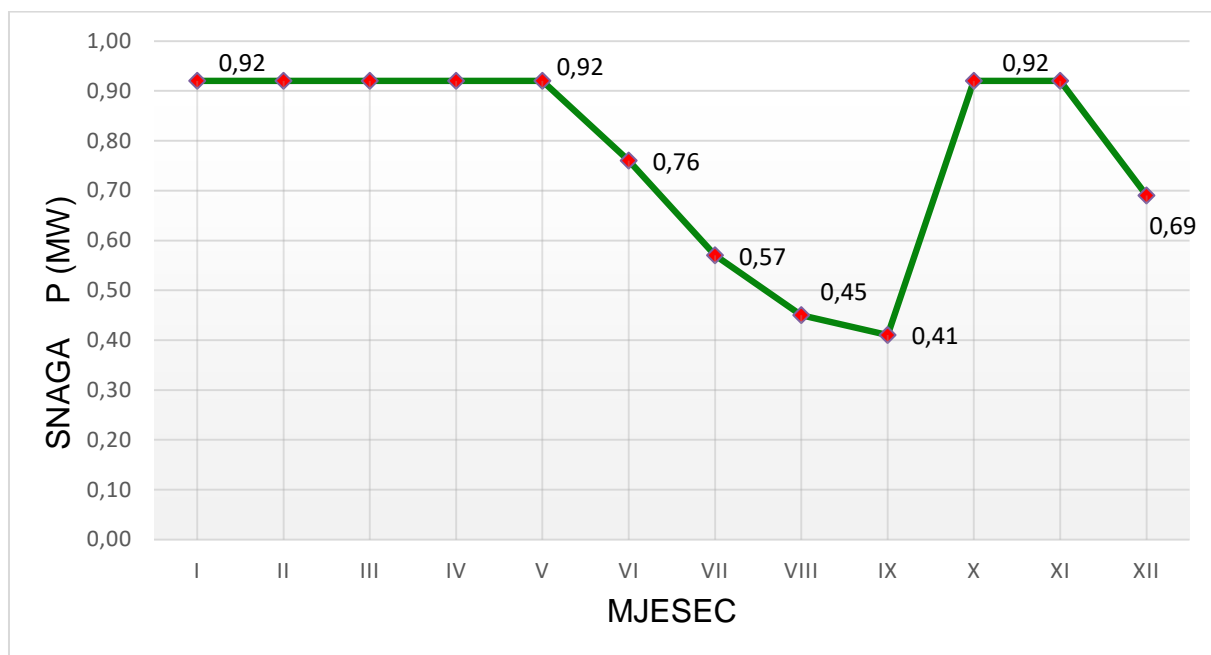
$$E = 6149169,6 \text{ kWh} = 6,15 \text{ GWh godišnje [21]}$$

Tablica 11. Proračun snage i godišnje proizvodnje energije za 2015. godinu

Mjesec	Q_{sr} (m ³ /s)	T (dani)	Δt (h)	H_n (m)	η	P (MW)	ΔE (GWh)	E (GWh)
I	11,25	31		16,50	0,95	0,92		0
II	20,85	59	744	16,75	0,96	0,92	0,68	0,68
III	9,9	90	672	16,45	0,94	0,92	0,62	1,30
IV	8,15	120	744	16,40	0,94	0,92	0,68	1,99
V	5,65	151	720	16,35	0,92	0,92	0,66	2,65
VI	4,3	181	744	16,30	0,90	0,76	0,63	3,28
VII	3,2	212	720	16,25	0,89	0,57	0,48	3,76
VIII	2,5	243	744	16,20	0,89	0,45	0,38	4,14
IX	2,3	273	744	16,20	0,89	0,41	0,32	4,46
X	13,2	304	720	16,65	0,95	0,92	0,48	4,93
XI	6,3	334	744	16,35	0,94	0,92	0,68	5,62
XII	3,9	365	720	16,25	0,90	0,69	0,58	6,20
	UKUPNO						6,20	



Slika 30. Krivulja godišnje proizvodnje energije za 2015. godinu



Slika 31. Krivulja trajanja snage za 2015. godinu

4.4. Ekološke karakteristike MHE

Ekološki prihvatljiv protok (EPP) osigurava ekološku ravnotežu i čuva prirodnu stabilnost ekosustava vodotoka. Za određenu dionicu vodotoka ne treba nužno biti definiran kao jedna vrijednost minimalnog protoka (Q_{bm}) koja važi tijekom cijele godine. Često se radi o nizu različitih protoka koje treba ispuštati tijekom sezone [4].

Brojne metode, modeli, pristupi za određivanje EPP-a – od jednostavnih i brzih do složenih i dugotrajnih postupaka podijeljeni su u četiri osnovne skupine:

1) Brzi i približni postupci određivanja EPP-a

- Na osnovu hidrološki podataka
- $QE = (0,15-0,20) \times Q(\text{srednji godišnji protok})$
- $QE = (0,7-1,3) \times Q(\text{prosječna vrijednost minimalnih godišnjih protoka})$
- Veća vrijednost koeficijenta se koristi za manje vodotoke [4]

2) Metode kod kojih se koristi jedan ili manji broj važnih kriterija za određivanje EPP-a

- Metoda omočenog opsega; metoda presjeka [4]

3) Kompleksne interdisciplinarne metode određivanja EPP-a

- Višekriterijalne metode [4]

4) Metode simulacija staništa u otvorenim vodotocima

- FIM (Flow Incremental Methodology)
- PHABSIM (Physical HABitat SIMulation System) [4]

Izgradnja MHE može dovesti i do promjene u pronosu sedimenta:

- sedimentacije ispred brane
- erozije nizvodno od brane [4]

5. Zaključak

Izvor Jadra najznačajniji je objekt u vodoopskrbnom sustavu grada Splita (više od 1700. godina), a danas i njegove šire okolice. Pored toga Jadro obiluje i hidrotehničkim potencijalom, te je pogodan za izgradnju više malih hidroelektrana. Temeljem hidroloških karakteristika i podloga (karakteristika pada i vodotoka, srednjih dnevnih vodostaja i protoka, KTP, itd.) odabrana je pozicija za projektiranje MHE, a nalazi se u blizini stare tvornice Portland cementa *10. Kolovoz*, koju je pokretala MHE *Vrilo*. To znači da na odabranoj lokaciji već postoji prometna infrastruktura, kao i dobre mogućnosti za priključak na elektroenergetski sustav. Činjenica da je dovodni kanal stare MHE *Vrilo* dobro očuvan dodatno smanjuje investicijske troškove.

Zagađenje planete koje je čovjek prouzrokovao, navelo ga je na korištenje obnovljivih izvora energije, a tu MHE imaju veliku ulogu. Utjecaj na okoliš jedne MHE praktički je eliminiran; uz današnju tehnologiju s posebno malim i tihim agregatima, fish friendly turbinama ili akustičnim pregradama koje usmjeravaju ribe ka ribljim stazama. Male hidroelektrane su revolucija i budućnost opskrbe električnom energijom.

Kažem budućnost, jer još je ljude potrebno educirati o potencijalu malih hidroelektrana i njihovoj (NE)štetnosti!

6. Grafički prilozi

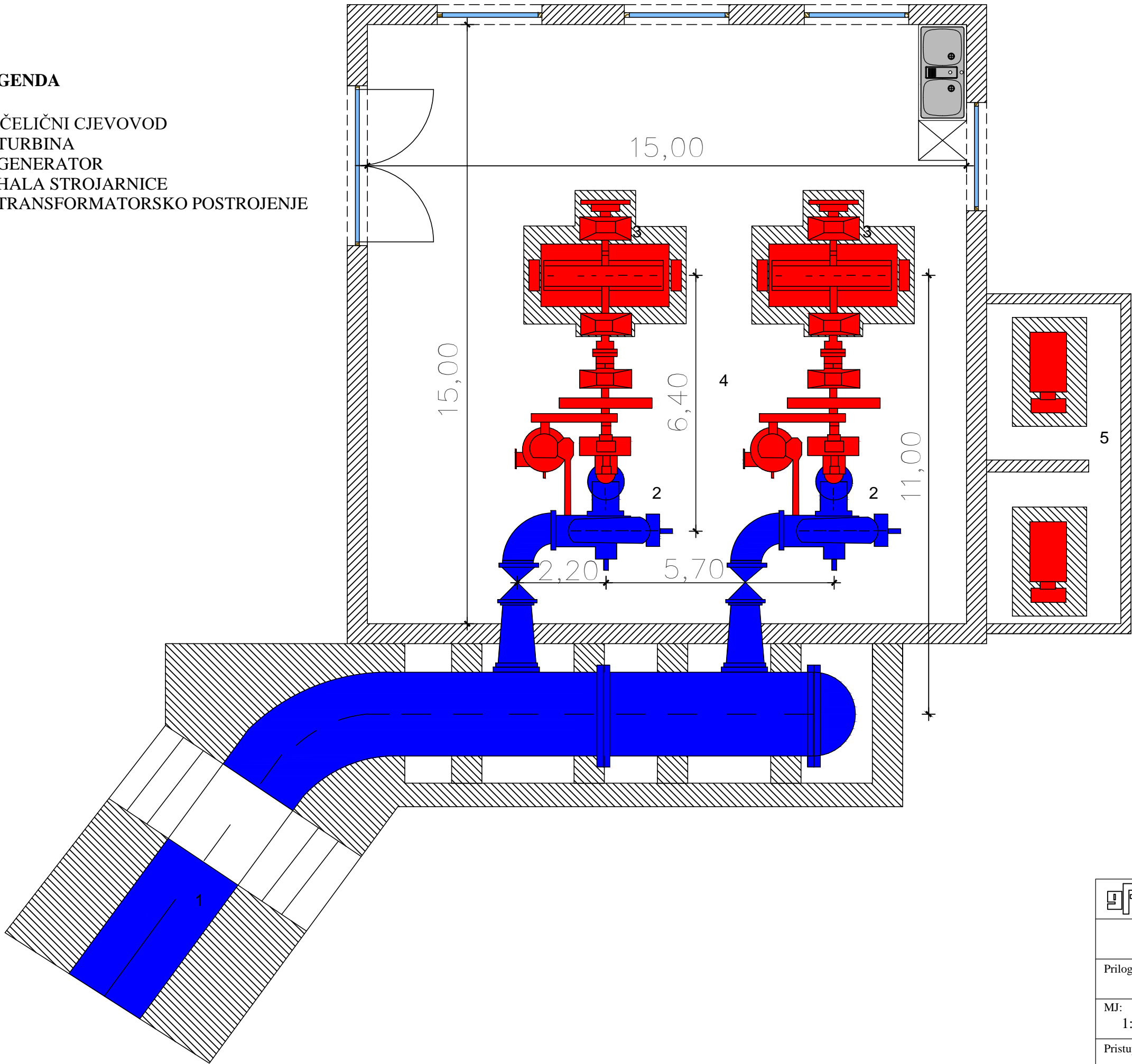
6.1. Tlocrt zgrade strojarnice


6.2. Poprečni presjek zgrade strojarnice

TLOCRT ZGRADE STROJARNICE

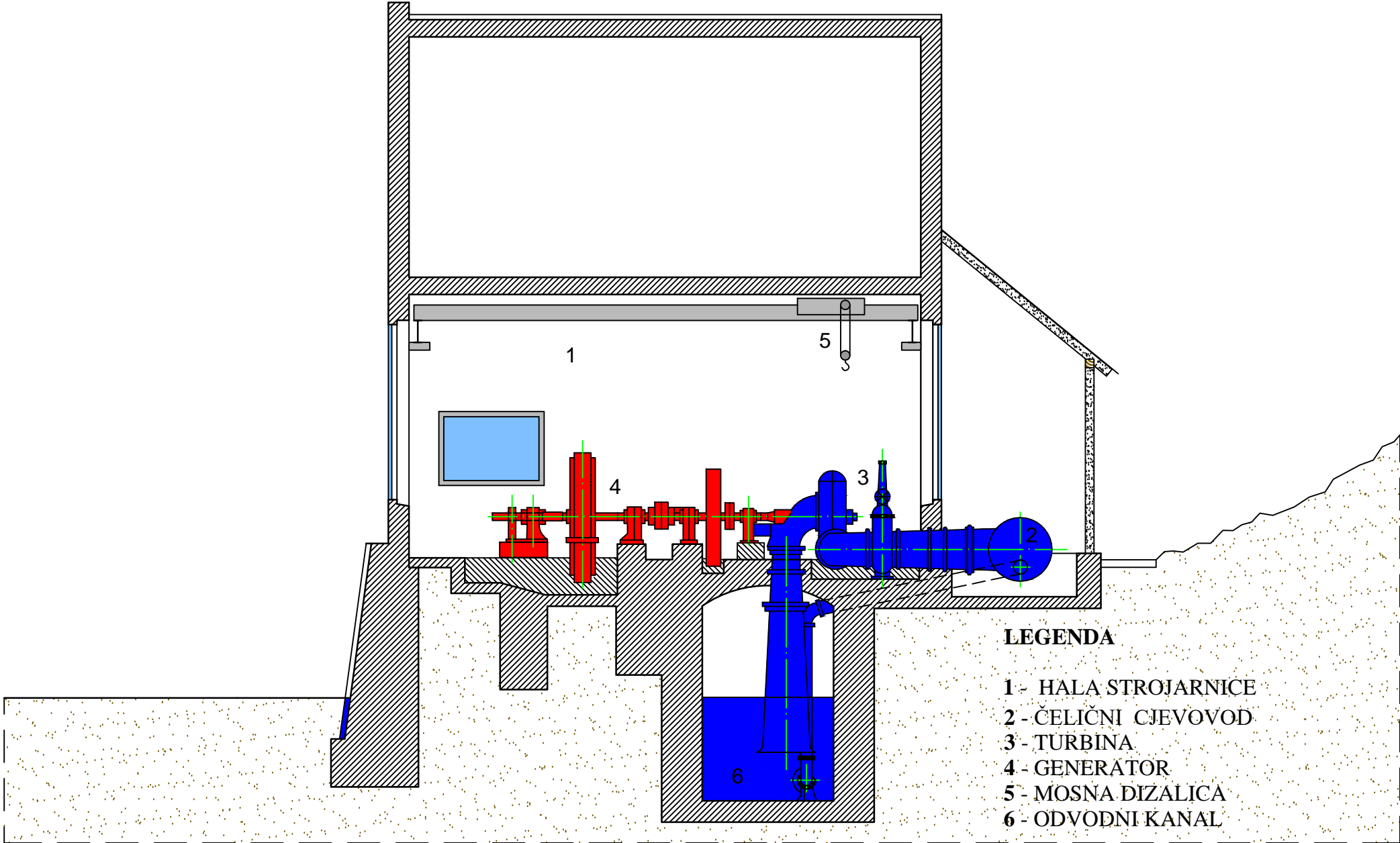
LEGENDA


- 1 - ČELIČNI CJEVOVOD
- 2 - TURBINA
- 3 - GENERATOR
- 4 - HALA STROJARNICE
- 5 - TRANSFORMATORSKO POSTROJENJE



<div> SVEUČILIŠTE J.J. STROSSMAYERA U OSIJEKU GRAĐEVINSKI FAKULTET OSIJEK</div>		
ODREĐIVANJE OSNOVNIH KOMPONENTI ZA PROJEKTIRANJE MALE HIDROELEKTRANE		
Prilog:	TLOCRT ZGRADE STROJARNICE	Izrađeno: 25.1.2017.
MJ:	1:100	Primljeno: 2.2.2017.
Pristupnik:		Mentor:
Srđan Maričević		Izv.prof.dr.sc. Marija Šperac, dipl.ing.građ.

POPREČNI PRESJEK ZGRADE STROJARNICE



 SVEUČILIŠTE J.J. STROSSMAYERA U OSIJEKU GRAĐEVINSKI FAKULTET OSIJEK		
ODREĐIVANJE OSNOVNIH KOMONENTI ZA PROJEKTIRANJE MALE HIDROELEKTRANE		
Prilog:	POPREČNI PRESJEK STROJARNICE	Izrađeno: 25.1.2017.
MJ:	1:100	Primljeno: 2.2.2017.
Broj priloga: 6.2		Mentor:
Pristupnik:		Izv.prof.dr.sc. Marija Šperac, dipl.ing.građ.
Srđan Maričević		

7. Literatura

1. Sveučilište u Splitu, sveučilišni odjel za stručne studije, Dr.sc. Zlatko Jankoski, dipl.ing.stroj., prezentacija: Obnovljivi izvori energije
2. <http://bkc-gracanica.ba/hidroelektrana-na-rijeci-spreci-u-donjoj-orahovici/>
3. [http://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Elektrane_01\[1\].pdf](http://www.fer.unizg.hr/_download/repository/Elektrane_01[1].pdf)
4. <http://www.menea.hr/wp-content/uploads/2013/12/6-hidroelektrane.pdf>
5. Građevinski fakultet Osijek, Izv.prof.dr.sc. M. Šperac, prezentacija: Korištenje vodnih snaga 1
6. http://rgn.hr/~drajkovi/nids_damirrajkovic/skripta/Skripta_PiPE.pdf
7. Građevinski fakultet Osijek, Izv.prof.dr.sc. M. Šperac, prezentacija: Hidrotehnički sustavi 1
8. <http://www.tellhowpower.de/hydro-plant.html>
9. <http://www.advantageaustria.org/hr/Guzovic0414.pdf>
10. Građevinski fakultet Osijek, Izv.prof.dr.sc. M. Šperac, prezentacija: Korištenje vodnih snaga 7
11. http://www.voda.hr/sites/default/files/pdf_clanka/hv_85_2013_225-234_ljubenkovic-vranjes.pdf
12. <http://hidro.dhz.hr/> Državni hidrometeorološki zavod, Informacije o postaji Majdan
13. <http://www.casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-63-2011-12-05.pdf>
14. M. Benšić, N. Šuvak – Uvod u vjerojatnost i statistiku, Osijek 2014.
15. <http://www.mathos.unios.hr/~darija/papers/teza.pdf>
16. <http://streamflow.engr.oregonstate.edu/analysis/floodfreq/#log>
17. <https://support.office.com/hr-hr/article/SKEW-opis-funkcije-bdf49d86-b1ef-4804-a046-28eaea69c9fa>
18. <http://web.efzg.hr/dok/STA/mcizmesija/6.%20Asimetrija%20i%20zaobljenost.P.pdf>
19. <http://streamflow.engr.oregonstate.edu/analysis/floodfreq/skew.htm>
20. <https://www.khanacademy.org/math/probability/data-distributions-a1/summarizing-spread-distributions/a/calculating-standard-deviation-step-by-step>
21. http://www.mzoip.hr/doc/elaborat_zastite_okolisa_262.pdf

-
22. <http://www.casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-55-2003-08-09.pdf>
 23. <https://www.panoramio.com/photo/67201804>
 24. B. Markovčić, I. Prpić, F. Plic, A. Busatto, Razvoj elektrifikacije Hrvatske I dio, Zagreb 1984.
 25. <http://www.duzs.hr/cpage.aspx?page=print.aspx&NewsID=11152>
 26. https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/3_KVS_koristenjevodnih_snaga.pdf
 27. P. Stojić Hidroenergetika, Energetsko iskorištavanje vodnih resursa, Split 1995.
 28. <http://www.eternoohydro.com/turbines/francis-turbines.html>
 29. <http://www.smallhydroturbines.com/supplier-86362-francis-hydro-turbine>